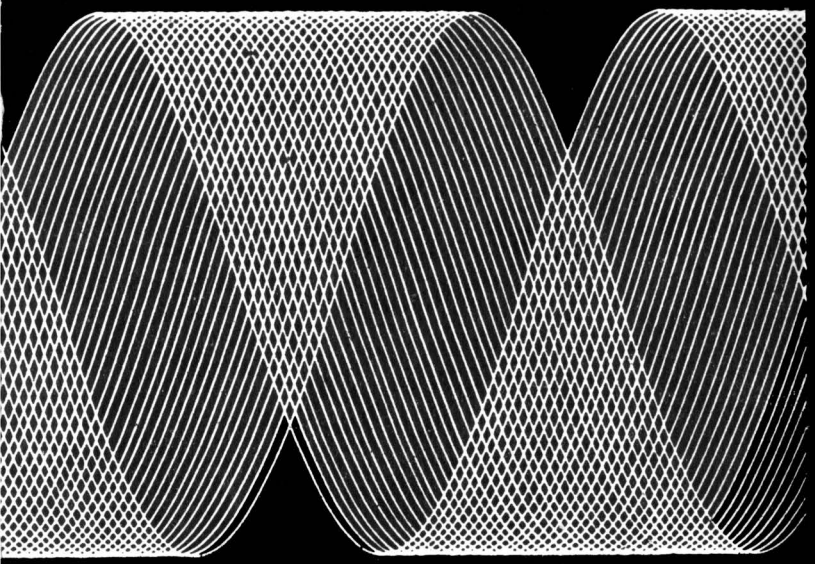
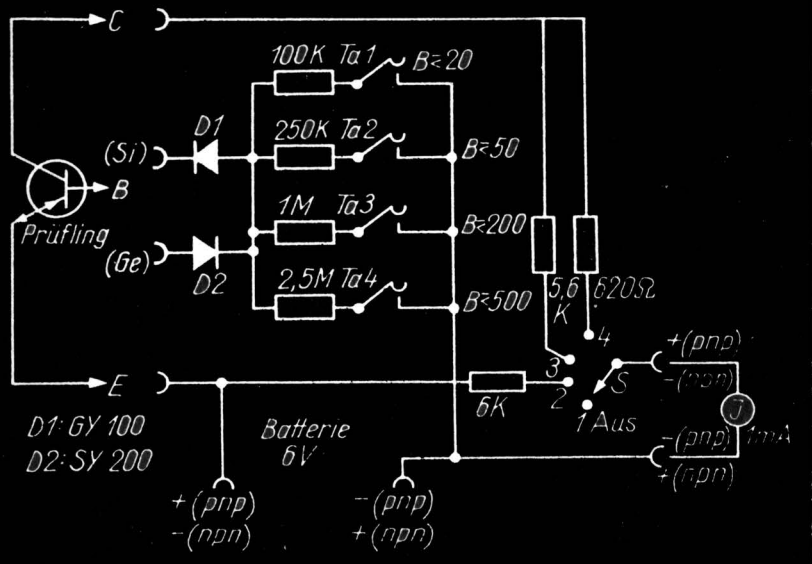
amateurreihe

electronica





Hagen Jakubaschk

160

Prüf- und Meßschaltungen für Halbleiter

Leer

electronica · Band 160

HAGEN JAKUBASCHK

Prüf- und Meßschaltungen für Halbleiter

MILITÄRVERLAG
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN
REPUBLIK

© Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik (VEB) — Berlin, 1978

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	5
1.	Einleitende Hinweise	8
2.	Halbleiter und ihre für den Amateur interessanten Daten	12
2.1.	Bipolare Kleinleistungstransistoren	13
2.1.1.	Germaniumtypen (pnp und npn)	13
2.1.2.	Siliziumtypen (pnp und npn)	18
2.2.	Leistungstransistoren	24
2.3.	Feldeffekttransistoren	26
2.3.1.	MOSFET	26
2.3.1.1.	n-Kanal-Verarmungs-MOSFET	26
2.3.1.2.	p-Kanal-Anreicherungs-MOSFET	28
2.3.1.3.	Andere MOSFET-Typen	28
2.3.2.	Sperrschicht-FET (SFET)	29
2.4.	Thyristoren und Triac	32
2.4.1.	Kleinleistungstypen	32
2.4.2.	Leistungstypen	34
2.5.	Dioden	35
2.5.1.	Kleindioden	35
2.5.2.	Gleichrichterdioden	36
2.5.3.	Z-Dioden	36
2.5.4.	Diac und Vierschichtdioden (VD)	39
3.	Hinweise für die Ermittlung von Halbleiterart und Anschlußlage bei Bauelementen unbekannter Herkunft	42
3.1.	Erste Abschätzung nach äußeren Merkmalen	42
3.2.	Bipolartransistoren (npn, pnp, Silizium, Germanium)	46
3.3.	Feldeffekttransistoren	51
3.3.1.	Ermittlung der Anschlußlage	51
3.3.2.	Mögliche Sonderformen	58
3.4.	Thyristoren und Triac	61
3.5.	Dioden und Gleichrichter	64

3.6.	Diac und Vierschichtdioden (VD)	68
4.	Prüf- und Meßschaltungen für die Amateurpraxis	70
4.1.	Prüfgerät für bipolare Kleinleistungstransistoren	70
4.2.	Prüfgerät für bipolare Leistungstransistoren	72
4.3.	Paarungsprüfer für bipolare Transistoren	73
4.4.	Sättigungsspannungstester für npn-Silizium-transistoren	76
4.5.	FET-Prüfer für Verarmungstypen	78
4.6.	FET-Prüfer für Anreicherungs-MOSFET	81
4.7.	Kombiniertes Transistorprüfgerät	84
4.8.	Thyristor- und Diodenprüfgeräte	92
4.8.1.	Diodentester	92
4.8.2.	Thyristorprüfer	93
5.	Sonderprüfungen	97
5.1.	Sperrspannungsprüfungen	97
5.1.1.	Transistoren und Dioden	97
5.1.2.	Thyristoren, Triac, Diac, Vierschichtdioden	100
5.2.	Rauschtester für Transistoren	102
5.3.	Grenzfrequenztester	105
6.	Hinweise zu möglichen Meßfehlern beim Ausmessen von Transistoren	106
7.	Literaturhinweise	108

Vorwort

In der Amateur- und Bastlerliteratur existieren bereits mehrere Beschreibungen für Halbleiterprüfgeräte, insbesondere für Transistoren. Sie sind aber so verstreut veröffentlicht und oftmals auch im angewendeten Meßprinzip so unterschiedlich, daß es dem Amateur schwerfällt, die für ihn jeweils günstigste Variante auszuwählen. Seit einiger Zeit ist das Angebot an Halbleiterbauelementen bemerkenswert größer geworden, und zwar auch an gegenüber dem „klassischen" bipolaren Transistor funktionell andersartigen Bauelementen. Beispiele dafür sind integrierte Schaltkreise, Feldeffekttransistoren, Thyristoren und deren Abwandlungen. Außerdem verwendet der Amateur gleichzeitig zunehmend Germanium- und Siliziumtransistoren (in der Komplementärtechnik). Oft wird auch übersehen, daß keineswegs alle in der Vergangenheit für Germaniumtransistoren publizierten Transistorprüfer durch einfaches Umpolen von Batterie und Meßinstrument oder ähnlich einfache Maßnahmen auch für Siliziumbauelemente brauchbar sind. Ein Grund dafür ist u. a. der unterschiedliche Einfluß der Basis-Emitter-Schwellenspannung von Germanium und Silizium je nach Prüfschaltung und Prüfprinzip. Derzeit besteht noch vielfach die Situation, daß der Amateur gezwungen ist, eine mehr oder weniger auf Kompromisse ausgelegte, ältere Transistorprüfschaltung für pnp-Germanium-Typen (oft selbst auf npn-Prüfmöglichkeit erweitert) und dazu weitere gesondert aufgebaute Prüfgeräte für Feldeffekttransistoren, für Thyristoren usw. zu benutzen. Das „Angebot" an wirklich brauchbaren Prüfschaltungen für letztgenannte Bauelemente ist in der Amateurliteratur außerdem noch nicht allzu reichhaltig und vorwiegend in Fachzeitungen verstreut. Man benötigt aber Prüf- und Meßmöglichkeiten für alle erwähnten Halbleiterbauelemente, weil inzwischen im Amateurbereich die Verwendung von „Bastlerware", d. h. verbilligt angebotenen Typen ohne garantierte Daten, dominiert. Der

Bastler braucht diese Prüfmöglichkeiten aber weder tagtäglich noch mit der für industrielle Labors und Betriebe zu fordernden Meßgenauigkeit. Damit ist für den Amateur weniger die Frage nach aufwendigen, genauen, entsprechend zeitraubend oder kostspielig zu bauenden Prüfgeräten für die zahlreichen Halbleiterarten aktuell, vielmehr kommt es für ihn auf das „Gewußt, wie" und die Kenntnis schnell improvisierbarer Prüf- und Meßmöglichkeiten im jeweiligen Bedarfsfall an.

Mit dem vorliegenden Band soll dem Amateur eine zusammenfassende Darstellung von für ihn geeigneten Prüfmethoden für alle wesentlichen, ihm derzeit zugänglichen Halbleiterbauelemente gegeben werden. Dabei wurde davon ausgegangen, daß der Amateur in der Lage sein muß, mit einem Minimum an Prüf- und Meßmittelaufwand alle für seine Arbeiten wesentlichen Daten mit für den Amateurbereich ausreichender Genauigkeit ausmessen zu können. Es sind deshalb zunächst die für den Amateur interessanten und mit seinen Mitteln erfaßbaren Kennwerte und ihre Ermittlung betrachtet. Hierfür werden viele bewährte, geeignete Prüfschaltungen zum Nachbau gezeigt. Die Broschüre enthält insbesondere solche Schaltungen, die sich zur Kombination untereinander eignen oder leicht improvisieren lassen. Der Amateur ist also nicht gezwungen, stets ein Prüfgerät für eine bestimmte Halbleiterart aufbauen zu müssen; er kann die von ihm im Augenblick benötigte Prüfeinrichtung verwenden und sie später bedarfsweise auf andere Halbleitertypen erweitern. Neben einfachen Prüfschaltungen für bipolare Transistoren (npn und pnp, Germanium und Silizium) und solchen für Feldeffekttransistoren (Anreicherungs- und Verarmungstypen, sowohl p-Kanal- wie n-Kanal) sowie Prüfschaltungen für Thyristoren und Dioden verschiedener Art werden auch einige kombinierte Schaltungen gezeigt. Mit ihnen lassen sich die wichtigsten der genannten Bauelemente und Leistungsklassen auf einem einheitlichen Prüfgerät übersichtlich in allen wesentlichen Daten prüfen.

Auf Prüfschaltungen und Prüfgeräte für integrierte Schaltkreise wurde bewußt verzichtet, weil dieses Gebiet zu komplex ist und den Rahmen der Broschüre weit überschreiten würde. Außerdem werden diese Bauelemente und auch ihre Funktions-

und Datenprüfung ausführlich sowohl im Titel „Das große Schaltkreis-Bastelbuch“ des gleichen Verfassers [1] als auch in mehreren Broschüren der Reihe „electronica“ ([2], [3], [4] u. a.) behandelt.

Da der Amateur oft auch Bauelemente unbekannter Herkunft oder ohne Typenaufdruck in die Hand bekommt bzw. bei Bastlerware wegen der äußerlich oft gleichen Bauform Verwechslungsmöglichkeiten gegeben sind (z. B. Silizium-Miniplast-Transistoren mit MOSFET, einige Silizium-Transistoren der SF-Typenreihe mit Germanium-Typen gleicher Gehäuseform usw.), enthält die Broschüre Ratschläge, wie ein unbekanntes Bauelement ohne allzu großes Zerstörungsrisiko zunächst einmal auf seine Art geprüft und bestimmt werden kann, bevor eine Messung der Daten erfolgt. In jedem Fall sind aber vorhandene Grundkenntnisse über Funktion, Aufbau und Eigenschaften der zu prüfenden Halbleiter selbstverständliche Vorbedingung für ihre Prüfung und spätere Verwendung!

Nahmitz, im Frühjahr 1976 *Hagen Jakubaschk*

1. Einleitende Hinweise

Zunächst sollte der Amateur überlegen, was für seine Zwecke unter einem Halbleiter-Prüfgerät zu verstehen ist. Dabei ist zu fragen: Wie oft wird das Gerät benötigt? Welche Halbleiter-„Familien" sollen damit (vorzugsweise oder überhaupt) geprüft werden? Welche Stückzahlen sind zu prüfen, und wie „rationell" muß geprüft werden? Welche Meßgenauigkeit ist für den Amateur notwendig, welche ist sinnvoll? Soll ein einziges, entsprechend kompliziertes Prüf- und Meßgerät möglichst „für alles" oder sollen einfachere, übersichtlichere Geräte für einen eingeschränkten Typenkreis gebaut werden, und wenn, für welche Halbleitertypen? Welcher Aufwand soll und kann für das Prüfgerät getrieben werden, was darf es kosten? Betrachtet man diese Fragestellungen zusammenfassend, so lassen sie sich auf die einfache Formel „Material- und Kostenökonomie contra Vielseitigkeit und technischen Aufwand" bringen. Diese Relation sieht aber für den Amateurbereich grundlegend anders aus als für industrielle Anwender. Beispielsweise hat der Amateur kaum jemals mit Serienmessungen größerer Stückzahlen des gleichen Bauelements zu tun, wie dies für Halbleiterhersteller, Eingangskontrollen in weiterverarbeitenden Betrieben usw. gilt. Der Zeitfaktor je Prüfvorgang ist für den Amateur daher unwesentlich; bei ihm darf die Prüfung und Messung durchaus etwas länger dauern. Ähnlich sieht es für ihn bezüglich der Meßgenauigkeit aus. Fast immer reichen für Schaltungen, die für Nachbau durch Amateure bestimmt sind, Näherungswerte aus. Für diese Zwecke genügt es z. B., den Stromverstärkungsfaktor eines Bipolartransistors mit „etwas mehr als 50", statt exakt mit 52 oder 54, zu bestimmen und im Zweifelsfall das Meßergebnis etwas zur jeweils ungünstigeren Seite hin abzurunden. Sinnvollerweise wird man deshalb für derartige Amateurmeßgeräte geringere Genauigkeiten (mögliche Meßfehler von z. B. $\pm 10\%$) zulassen, womit sich fast immer der Meßaufbau ganz ent-

scheidend vereinfachen läßt. Ist die Messung derart sinnvoll beschränkt, so brauchen weitere, komplizierende Größen wie der Zusammenhang zwischen Halbleitertemperatur und wirksamem Stromverstärkungsfaktor im genannten Beispiel nicht berücksichtigt werden. Schließlich sind einige Daten (wie maximale zulässige Verlustleistung, innerer Wärmewiderstand usw.) mit Amateurmitteln überhaupt nicht meßbar, oder ihre Messung wäre zu aufwendig bzw. für die unmittelbaren Amateurbelange zu wenig aussagekräftig. Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Universalität des Prüfgerätes. Für nur gelegentlich und in wenigen Exemplaren benutzte Halbleiter lohnt der Aufbau fertiger Prüfschaltungen kaum. Wollte man solche Fälle in einem Gesamtgerät mit berücksichtigen, so ergäbe sich für dieses eine sehr komplizierte, aufwendige und (auch in der Bedienung) unübersichtliche Gesamtschaltung. Solche Messungen sollten besser mit „fliegend" aufgebauten Versuchsschaltungen improvisiert sein. Wichtig ist dagegen gerade für den Amateur, der sein Gerät nicht täglich benutzt, ein einfacher, in der Bedienung übersichtlicher Aufbau. Fehlbedienungen, die zu unbemerkt bleibenden falschen Ergebnissen oder zum „Totprüfen" des Prüflings (Zerstörung) führen können, müssen weitgehend ausgeschlossen sein. Auch diese Überlegung spricht gegen komplizierte Meßschaltungen für die unterschiedlichsten Halbleiterarten. Das Halbleiterprüfgerät mit den meisten Meßmöglichkeiten ist also gerade für den Amateur nicht unbedingt das beste!

Zum Aufwand für das Gerät ist zu bedenken, daß ein fertig aufgebautes Prüfgerät während der Zeit, in der es unbenutzt im Regal steht, „totes Kapital" für den Amateur darstellt. Kostspieligster Bestandteil eines solchen Gerätes ist meistens das oder die verwendeten Einbau-Meßinstrumente. Sie sind für ein nur gelegentlich benutztes Gerät einfach „zu schade". Das Gerät sollte deshalb möglichst so ausgelegt sein, daß dafür bei Bedarf der vorhandene Vielfachmesser, ohne den der Amateur ohnehin bei seinen Arbeiten kaum auskommt, angeschlossen werden kann. Bei der Auswahl des Meßverfahrens ist außerdem zu bedenken, daß jedes neugebaute Meßmittel geeicht werden muß. Es ist also auch zu klären, ob hierfür über-

haupt Eichmöglichkeiten bestehen! Deshalb sind stets solche Meßverfahren zu bevorzugen, die sich letztlich auf Strom- oder Spannungsmessungen zurückführen lassen (womit der vorhandene Vielfachmesser als „Eichnormal" verfügbar ist) oder die als die Meßgenauigkeit bestimmende Bauelemente nur solche verwenden, die der Amateur mit vorhandenen Mitteln selbst kontrollieren kann. Im allgemeinen sind das Widerstände, deren genaue Werteinhaltung mit Amateurmitteln noch am relativ einfachsten zu prüfen ist.

Unter Berücksichtigung aller genannten Überlegungen scheint für die Amateurwerkstatt die folgende Lösung die günstigste zu sein: Ständig betriebsbereit vorhanden sein sollte ein Meßgerät für bipolare Transistoren (Germanium und Silizium, npn und pnp), eventuell ausgerüstet mit der zusätzlichen Prüfmöglichkeit für Leistungstransistoren bei höheren Strömen und für die wichtigsten MOSFET-Typen. Ein solches Gerät wird in Abschnitt 4.7. beschrieben. Damit sind Funktionsprüfung und Messung der wichtigsten Kenndaten (Kollektorreststrom und Stromverstärkungsfaktor bei Bipolartransistoren, Abschnür- oder Öffnungsspannung und eventuell Steilheit sowie Drain-Ruhestrom bei MOSFET) sowie allenfalls einige einfach realisierbare Zusatzprüfungen (Rauschverhalten-Test) übersichtlich und mit wenig Aufwand möglich. Alle sonstigen Daten, deren Kenntnis oft für die beabsichtigte Verwendung des Prüflings gar nicht notwendig ist, sollten ebenso wie andersartige Bauelemente (Dioden, Thyristoren usw.) bei Bedarf mit provisorisch aufgebauten Versuchsschaltungen ermittelt werden, zu denen im folgenden entsprechende Beispiele gezeigt sind. Es bleibt dem Leser überlassen, diese Einzelschaltungen ebenfalls als fertig greifbare Prüfgeräte bereitzustellen. Ihr geringer Aufwand rechtfertigt dies in vielen Fällen.

Jeder Bastler benötigt für seine Arbeit einen Vielfachmesser mit den üblichen Spannungs- und Strommeßbereichen und den heute üblichen Kenndaten 20 kΩ/V für die Spannungsbereiche bzw. 50 μA als niedrigstem Strommeßbereich! Ohne ihn ist der Aufbau von Halbleiterprüfgeräten (ausgenommen einfachste improvisierte Funktionstestschaltungen) sinnlos.

Außerdem wird dadurch die Wahl der von ihm praktisch realisierbaren Bauobjekte sehr stark eingeschränkt.
Eine zweite Voraussetzung, die ebenfalls selbstverständlich sein sollte ist, daß man sich beim Prüfen oder Messen eines Halbleiters sowohl über dessen Funktion als auch über die im Normalfall zu erwartenden Meßwerte im klaren sein muß. Dazu sind Datenblätter oder wenigstens Kenndaten zu dem zu prüfenden Halbleiter erforderlich. Sie zu beschaffen ist allerdings für den Amateur gelegentlich problematisch. Für Transistoren aller Art ist [5] eine gute Hilfe, das die wichtigsten Kennwerte von mehr als 16 000 Transistoren von Herstellern aus aller Welt enthält. Für andere Halbleiterbauelemente (Thiristoren, Triac, Dioden) kann der Amateur Daten entweder den Veröffentlichungen der Fachzeitungen (z. B. Datenblattbeilagen der Zeitschrift FUNKAMATEUR ab Jahrgang 1976, aus den Halbleiterinformationen der Fachzeitschrift „radio-fernsehen-elektronik" u. ä.) oder den von der Halbleiterindustrie ausgegebenen, auch im RFT-Amateurbedarfshandel erhältlichen Informationsdatenheften entnehmen. Sehr wichtig ist außerdem die Kenntnis von Typenbezeichnung, mindestens aber Art, Zweckbestimmung und Herkunft des Prüflings. Ohne Kenntnis dieser Einzelheiten wird angesichts der Vielfalt von Typen, Daten, Funktion, Aufbau und Bestimmungszweck der zahlreichen (oft äußerlich gleichartigen) Halbleiterfabrikate vielfach auch dem Fachmann keine Zweck- und Datenbestimmung möglich!

2. Halbleiter und ihre für den Amateur interessanten Daten

Im Sinne des einleitend Gesagten lassen sich für die amateurgerechte Messung einige sinnvolle Einschränkungen machen. So ist es wohl immer überflüssig, vollständige Kennlinienfelder aufzunehmen. Auf entsprechende Möglichkeiten zur automatischen Kennlinienschreibung (die neben z. T. erheblichem Aufwand für die Meßgerätschaltung stets das Vorhandensein eines Oszillografen erfordert) sei deshalb nur verwiesen ([6], [7], [8]). Für Transistoren, insbesondere Bipolartransistoren, kommt man im allgemeinen mit Messung eines Einzelwertes bei einem festen Arbeitspunkt aus. Dieser muß nicht exakt den vom Hersteller angegebenen Meßbedingungen entsprechen. Zwar ist gerade bei bipolaren Siliziumtransistoren beispielsweise der Stromverstärkungsfaktor stark vom Kollektorstrom, bei dem er gemessen wird, abhängig. Für den Amateur genügt es aber, entweder bei einem Arbeitspunkt in Nähe des vom Hersteller angegebenen zu messen (im Beispiel: Kollektorstrom für Messung von β oder B bei 0,5 ... 2 mA für Kleinsignaltransistoren) oder, je nach vorgesehenem Einsatzzweck des Prüflings, gleich bei dem später vorgesehenen Arbeitspunkt. Der erstere Fall empfiehlt sich als „Normalprüfung" zum Sortieren eines Transistorvorrats nach Stromverstärkungsgruppen. Verwendet man dabei stets das gleiche Transistorprüfgerät, so sind die ausreichend einheitlichen Meßbedingungen gesichert. Feldeffekttransistoren sortiert der Amateur zweckmäßig nach gestaffelten Werten der *Treshold*- oder *Pinch-off*-Spannung (U_T bzw. U_P) und bei Verarmungstypen zusätzlich nach dem Wert des Drainruhestroms I_{DSS} bei Gatespannung Null. Sinngemäß wird der Vorrat an Germaniumtransistoren außer nach β-Wertgruppen auch noch nach Reststromgruppen geordnet (z. B. $I_{ceo} < 0{,}1$ mA, 0,1 ... 0,25 mA, 0,25 ... 0,8 mA, $> 0{,}8$ mA). Diese Staffelung reicht jedoch, da I_{ceo} stark abhängig von der Halbleitertemperatur ist, nur für überschlägige spätere Orientierungen dient und nur sinn-

voll ist, wenn stets bei einigermaßen konstanter Raumtemperatur gemessen wird. Gerade für den Amateur ist ein Sortieren z. B. von ungetypter Bastlerware nach den genannten (jeweils 2) Kennwerten sehr vorteilhaft. Deshalb sind für entsprechende Meßschaltungen solche mit festem Arbeitspunkt vorzuziehen, damit stets gleiche Meßbedingungen vorliegen. Im Gegensatz dazu erlauben Schaltungen, die mit Potentiometern o. ä. die gleitende Einstellung verschiedener Arbeitspunkte (regelbare Basisspannungen und Kollektorströme usw.) gestatten, die vollständige Aufnahme von Kennlinien. Falls erforderlich, sind sie zu improvisieren. Zum Sortieren und zur schnellen Funktionsprüfung sind solche Schaltungen allerdings weniger geeignet.

2.1. Bipolare Kleinleistungstransistoren

2.1.1. Germaniumtypen (pnp und npn)

Zur Typengruppe der Kleinleistungstransistoren können alle Typen bis zur maximalen Verlustleistung $P_{tot} \approx 0{,}5$ W gerechnet werden, u. a. also die bekannte pnp-Germanium-Typenreihe *GC 100 ... GC 123*, GS- und GF-Typenreihen sowie der *GC 301* und alle datenähnlichen Importe. Die für den Amateur interessanten Kennwerte sind:
Kollektorreststrom I_{ceo} (Basis offen), Richtwert 0,1 ... 1 mA.
Kollektorreststrom I_{ceR} (Basis beschaltet), er liegt stets unter dem für I_{ceo} gemessenen Wert.
Stromverstärkungsfaktor β oder B, Richtwert 10 ... 500 sowie eventuell die:
maximale Kollektorsperrspannung U_{ceo} (Basis offen), Richtwert je nach Typ 15 ... 120 V;
maximale Kollektorsperrspannung U_{ceR} (Basis beschaltet), Richtwert je nach Typ mindestens gleich U_{ceo};
Kollektorsättigungsspannung U_{CEsat}, Richtwert 0,1 ... 1,2 V;
Rauschfaktor (für Amateur vereinfacht: Rausch-Test);
Basis-Emitter-Schwellenspannung U_{BE}, Richtwert 0,15 ... 0,35 V.

Für den Amateur nicht ermittelbar ist die maximal zulässige Verlustleistung P_{tot} in mW, sie läßt sich allenfalls mit Vorsicht abschätzen (bis etwa 100 mW sind meist zulässig).

Zu den genannten Werten einige Erläuterungen. Der Kollektorreststrom hängt außer von der Halbleitertemperatur (Umgebungstemperatur bei Messung!) noch von anderen Faktoren ab. Der Wert I_{ceo} verdoppelt sich bei Germaniumtransistoren jeweils bei Temperaturanstieg um etwa 8 ... 10 °C (8 ... 10 K). Ein bei 20 °C (293 K) mit $I_{ceo} = 0{,}2$ mA gemessenes Exemplar kann also bei 30 °C (303 K) bereits $I_{ceo} = 0{,}4$ mA aufweisen! Deshalb soll das Transistorgehäuse vor und während der Messung nicht mit den Fingern berührt (erwärmt) werden. Der Reststrom ist nur wenig von der Kollektorspannung, jedoch u. U. stark davon abhängig, ob die Basis offengelassen oder über einen Widerstand mit dem Emitter verbunden ist. Im letzteren Fall hängt der sich dann einstellende Reststrom I_{ceR} vom R-Wert ab (der deshalb als eine Meßbedingung mit anzugeben ist). Im allgemeinen wird er mit 1 kΩ angegeben. I_{ceR} ist am niedrigsten bei $R = 0$. Der mit $R = 0$ (kommt in der Praxis kaum vor) zu messende Wert ist meist annähernd gleich dem des Sperrstroms zwischen Kollektor und Basis bei offenem Emitter (als I_{cbo} bezeichnet) und für den Amateur deshalb meist uninteressant. Bild 2.1 zeigt die grundsätzliche Meßschaltung. Die I_{ceR}-Messung hat für den Amateur Bedeutung, wenn die Schaltung, für die der Prüfling vorgesehen ist, tatsächlich einen Widerstand zwischen Basis und Emitter enthält. Für dessen realen Wert läßt sich dann I_{ceR} bestimmen, was gelegentlich die Verwendung von Transistoren zuläßt, die einen bereits „unvorschriftsmäßig" hohen I_{ceo}-Wert aufweisen, da I_{ceR} je nach Größe von R weit unter I_{ceo} liegen kann. Allerdings ist dieser Hinweis mit Vorsicht aufzunehmen, falls der geprüfte Transistor in einer Amateurschaltung verwendet werden soll (Bauanleitungen!), für die ein I_{ceo}-Grenzwert des Transistors angegeben ist. Die durch R erfolgende durchschnittliche Reduzierung des I_{ceo} auf I_{ceR} ist nämlich oft schon im Schaltungsentwurf entsprechend den dort vorhandenen R-Werten mit berücksichtigt! Dies gilt, da man sich im allgemeinen auf die I_{ceo}-Messung beschränkt,

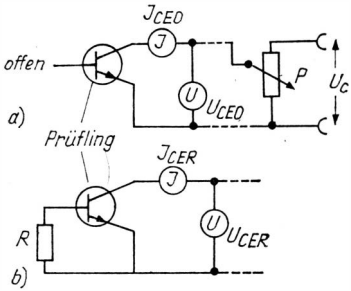


Bild 2.1. a — bei Bipolartransistoren wird mit offener Basis der Kollektorreststrom I_{ceo} und die maximale Kollektorsperrspannung U_{ceo} gemessen; b — ein zwischen Basis und Emitter vorhandener Ohmscher Widerstand R ergibt einen vom R-Wert abhängigen Reststrom I_{ceR} und eine Sperrspannung U_{ceR}. Zur U_{ceo}- oder U_{ceR}-Messung muß die Meßspannung U_c größer als U_{ceR} und (hier symbolis mit P angedeutet) regelbar sein.

für die meisten Amateurbauanleitungen, u. a. beispielsweise für die in [1], [9], [10] gezeigten Schaltungen. Die I_{ceR}-Messung hat daher für den Amateur nur gelegentlich Bedeutung; maßgebend ist der Wert I_{ceo}.

Für den Stromverstärkungsfaktor ist bei Kleinsignaltypen, wenn man sie mit geringen Kollektorströmen (Bereich weniger mA) betreibt, die Angabe der Kleinsignalstromverstärkung β üblich. Für höhere Ströme wird die Angabe der Großsignalstromverstärkung B (oft auch als allgemeine Stromverstärkungsangabe in neuerer Literatur verwendet) benutzt. Der Wert für β oder B hängt demzufolge, insbesondere bei Siliziumtransistoren, jedoch merklich auch bei Germaniumtypen, vom Kollektorstrom ab, bei dem gemessen wird. Bild 2.3 zeigt ein Beispiel dafür. Der Amateur kann bei Germaniumtypen mit zulässiger Näherung $\beta \approx$ B setzen, wenn er diese Größe bei etwa 0,5 ... 3 mA gemessen hat. Gelegentlich wird die Stromverstärkung auch als Vierpolparameter (h_{21e}) angegeben, der Amateur kann wiederum $h_{21e} \approx \beta \approx$ B setzen. Im Zweifelsfall empfiehlt es sich, für einen vorgegebenen Einsatz-

zweck und vorgeschriebenen β- oder B-Wert ein Exemplar mit 30 ... 100% höherem (selbst gemessenem) β-Wert einzusetzen.

Die Kollektorsperrspannung ist der maximal zulässige Kollektorspannungswert, bei dem gerade noch kein Durchschlag der Sperrschicht erfolgt. Er sollte niemals voll ausgenutzt werden. Die maximal zulässige Kollektorspannung hängt ebenso wie der Kollektorreststrom von der Beschaltung der Basis ab. In Bild 2.1 ist dies mit angegeben. Prinzipiell läßt sich dieser Grenzwert nach Bild 2.1a ermitteln (s. a. Abschnitt 5.1.). Mit P kann man die Kollektorspannung allmählich steigern. Sobald U_{ceo} erreicht und überschritten wird, ist eine plötzliche sehr starke Zunahme des Kollektorstroms I_{ceo} (der bis dahin nur langsam zunahm) feststellbar. Ist die Basis mit einem Widerstand R abgeschlossen, so liegt die maximal zulässige Sperrspannung (dann als U_{ceR} bezeichnet) über dem Wert für U_{ceo}, und zwar je nach Halbleitertyp und R-Wert bei 1,2 ... 3 · U_{ceo}. Man kann einen Transistor daher oft mit höherer Spannung betreiben, wenn feststeht, daß die Basis stets mit höchstens dem zugehörigen Maximalwert — besser einem etwas geringerem für R — beschaltet ist (in praktischen Schaltungen oft gegeben). Der Transistorhersteller gibt für den Zusammenhang zwischen U_{ceo}, U_{ceR} und R Kennlinien an. Die Kenntnis des Wertes U_{ceR} oder U_{ceo} (günstiger, weil er einen Sicherheitsabstand zu U_{ceR} schafft) ist für den Amateur nur bei höheren Betriebsspannungen erforderlich, weil für praktisch alle üblichen Germaniumtransistoren $U_{ceo} \geqq 15$V bzw. $U_{ceR} \geqq 20$ V (meist höher) gesetzt werden kann, wenn die Transistoren einwandfrei sind.

Eine für Schalteranwendungen in der Elektronik interessante Größe ist die Kollektorsättigungsspannung U_{CEsat}. Diese Größe (auch als Kollektorrestspannung bezeichnet) ist meßbar, wenn der Transistor voll durchgesteuert, d. h., sein Kollektorstrom durch äußere Maßnahmen (Widerstand im Kollektorkreis) auf einen vorgegebenen Wert begrenzt und der Basisstrom höher ist, als es für diesen Kollektorstrom bei gegebenem β-Faktor erforderlich wäre. Die Spannung U_{CEsat} ist dann zwischen Kollektor und Emitter meßbar, sie hängt stark vom

fließenden Kollektorstrom ab. Wenn dieser gegeben ist, läßt sie sich aber auch durch weiteres Vergrößern des Basisstroms nicht mehr verringern. U_{CEsat} ist daher der restliche Spannungswert, der über dem voll durchgesteuerten Transistor bei gegebenem Kollektorstrom noch abfällt. Für Schalterzwecke soll U_{CEsat} im allgemeinen möglichst niedrig sein. Eine Messung sollte der Amateur, wenn nötig, unter den jeweils vorgegebenen Einsatzbedingungen, oder bei entsprechend vorgesehenem Einsatzzweck simuliertem Kollektor- und Basisstrom, vornehmen. Die bei hohen Kollektorströmen niedrigsten U_{CEsat}-Werte weisen meist die „Schalter-Typen" bzw. speziellen Schalttransistoren auf.

Der Rauschfaktor, eine für Verstärkeranwendungen interessierende Größe, ist „normgerecht" nicht mit Amateurmitteln meßbar. Für den Amateur genügt es aber, aus vorhandenen Exemplaren „rauscharme" Typen herauszusuchen, wozu in der Praxis einfache Tests mit „gehörmäßiger Relativbewertung" ausreichen. Abschnitt 5.2. gibt dazu einige Hinweise. Allgemein kann man davon ausgehen, daß (bei Germaniumtypen) Exemplare mit geringem Reststrom I_{ceo} auch geringes Rauschen verursachen und daß im NF-Bereich als „rauscharm" beurteilte Typen auch bei HF-Verwendung geringes Rauschen haben.

Die Basis-Emitter-Schwellenspannung U_{BE} ist zunächst eine materialtypische Größe und für Germanium und Silizium stark unterschiedlich. Es ist diejenige Spannung, bei der ein Stromfluß in die Basis (und damit auch Kollektorstromzunahme über den I_{ceo}- bzw. I_{ceR}-Wert hinaus) einsetzt. Da die Basis-Emitterstrecke Diodencharakteristik hat, ist der U_{BE}-Wert daher mit der Schleusenspannung U_F bei Dioden des gleichen Halbleitermaterials identisch. Für Germanium beträgt dieser Mindestwert der Basisspannung etwa 0,15 ... 0,2 V; bei Silizium-Halbleitern liegt er mit 0,6 ... 0,7 V erheblich höher. Mit zunehmendem Basisstrom steigt U_{BE} (typenabhängig) nur noch relativ wenig an, wie es einer normalen Diodenkennlinie entspricht. Bei stärkeren Basisströmen können jedoch, da die Basisstrecke im Halbleiter noch einen unvermeidlichen ohmschen Widerstand aufweist, bis etwa 0,4 V

erreicht werden. Eine praktische Messung dieser Größe ist für den Amateurbereich überflüssig.
Die für den Prüfling maximal zulässige Verlustleistung kann der Amateur nicht messen. Eine grobe Orientierung ist höchstens nach der Gehäusetemperatur des Halbleiters möglich, deren praktische (zuverlässige!) Messung freilich mit Amateurmitteln auch recht schwierig ist. Es müßte z. B. mit Heißleiter-Temperaturfühler und zugehörigem geeichtem Meßinstrument nahezu punktförmig am Transistorgehäuse gemessen werden, wobei der Temperaturfühler auf seiner ganzen Ausdehnung sehr gut thermischen Kontakt mit dem Transistorgehäuse haben muß, ohne daß Wärme „verlorengeht"! Bei Germanium-Halbleitern soll die Gehäusetemperatur vorsichtshalber auch bei längerem Betrieb 60 °C (333 K) nicht übersteigen. Praktiker-Richtwert: Wenn der ausreichend lange betriebene Transistor mit den Fingerkuppen noch längere Zeit ohne Schmerzempfindung umfaßt werden kann, sind 60 ... 70 °C (333 ... 343 K) noch nicht überschritten. Bei unbekannten Transistoren sollte man jedoch sicherheitshalber weit unter dieser Höchstgrenze bleiben.
Alles Gesagte gilt für die Germaniumtransistoren, sowohl die weitverbreiteten pnp-Typen wie für die aus Importen auch dem Amateur erhältlichen npn-Germaniumtypen. Beide unterscheiden sich nur durch die unterschiedliche Polung für Basis- und Kollektorspannung; die Messung aller Größen wird davon nicht berührt.

2.1.2. Siliziumtypen (pnp und npn)

Auch bei Siliziumtransistoren unterscheiden sich die üblichen npn-Typen (zu denen sämtliche DDR-Siliziumtransistoren gehören) und die pnp-Typen nur durch die unterschiedliche Polung der Betriebsspannungen, jedoch nicht bezüglich der Maßgrößen und Meßvorgänge. Zu erwähnen ist hierbei allenfalls, daß pnp-Typen meist die von pnp-Germaniumtypen gewohnten relativ geringen Stromverstärkungsfaktoren (β bzw. B = 10 ... 70 im Durchschnitt) haben. Exemplare mit den

von npn-Siliziumtypen gewohnten hohen β-Werten von 100 ... 500 oder mehr sind bei pnp-Siliziumtypen seltener anzutreffen.

Die für Siliziumtransistoren interessierenden Größen sind die gleichen wie im vorangegangenen Abschnitt für Germaniumtransistoren aufgeführt. Alles dort Gesagte gilt daher sinngemäß auch hier, ebenso ist Bild 2.1 gleichermaßen für Siliziumtransistoren gültig. Eine praktische Einschränkung für I_{ceo} und I_{ceR} ergibt sich für den Amateur, da die Restströme bei Siliziumtransistoren im Nanoampere-Bereich liegen und daher mit seinen Mitteln nicht meßbar sind. Ein einwandfreier Silizium-Kleinleistungstransistor wird daher stets $I_{ceo} \approx 0$ zeigen. Werte über 10 μA sind unnormal und „fehlerverdächtig", können aber (je nach Verwendungsfall) noch einen vollwertigen Einsatz des Transistors, bei allerdings erhöhtem Langzeit-Ausfallrisiko, gestatten. Aus diesem Grund werden in Bauanleitungen für die Solldaten von Siliziumtransistoren keine I_{ceo}-Werte angegeben (weil stets $I_{ceo} \approx 0$ vorausgesetzt ist!) und beschränkt sich die Prüfung für I_{ceo} bei Siliziumtypen meistens auf eine einfache Ja/Nein-Aussage.

Der Stromverstärkungsfaktor (β oder B) kann bei npn-Siliziumtypen sehr hoch sein (in Einzelfällen > 1000!). Verschiedene Transistortypen werden vom jeweiligen Hersteller bereits nach Stromverstärkungsgruppen sortiert geliefert. Bei DDR-Typen erfolgt dies durch einen der Typenbezeichnung nachgesetzten Groß- oder Kleinbuchstaben. Es bedeutet für die Silizium-npn-Typenreihen SC...; SF...; SS...:

Gruppe A	oder a:	h_{21e} (β, B) =	18 ... 35
B	b	=	28 ... 71
C	c	=	56 ... 140
D	d	=	112 ... 280
E	e	=	224 ... 560
F	f	=	450 ... 1120

Eine ähnliche Gruppierung erfolgtf ür einige pnp-Germaniumtransistoren der DDR-Produktion (Typenreihen GC..., GS...) wie folgt:

Gruppe A oder a:	h_{21e} (β, B)	=	18 ... 35
B	b	=	28 ... 56
C	c	=	45 ... 90
D	d	=	71 ... 140
E	e	=	112 ... 224

Die Stromverstärkungsgruppen bei Germaniumtransistoren sind also nicht mit denen der Siliziumtypen identisch. Außerdem ist zu beachten, daß die Stromverstärkung B stark vom Kollektorstrom, bei dem sie gemessen wird, abhängt. Der Hersteller gibt z. B. für die obengenannte Klassifizierung für den Transistor *SF 121* die Meßbedingungen $U_{CE} = 2$ V und $I_c = 50$ mA an. Für die Miniplasttransistoren *SC 206*, *SC 207* erfolgt diese Messung bei 6 V und 2 mA. Der Amateur sollte daher, unabhängig davon, ob eine Klassifizierung angegeben ist oder nicht, die Stromverstärkung nach einheitlichem Verfahren selbst messen. Diese Messung erfolgt beim Hersteller ohnehin anders (nämlich dynamisch mit einer der Basisvorspannung überlagerten Wechselspannung). Bei der Messung von Transistoren mit sehr hoher Grenzfrequenz (was für die meisten Silizium-Exemplare sowie für Germanium-HF-Typen gilt) entstehen oft Meßfehler, die leicht unbemerkt bleiben. Der Prüfling gelangt in HF-Selbsterregung, ohne daß dies aus der Prüfschaltung zu vermuten ist. Bild 2.2 verdeutlicht das. Der zu prüfende Transistor ist bei C, B, E mit dem Prüf-

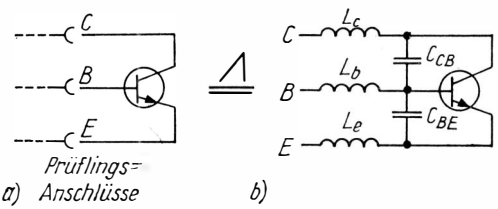


Bild 2.2 a — An einer Prüf- oder Meßschaltung angeschlossener Bipolartransistor-Prüfling; b — Er kann durch die Wirkung der Sperrschichtkapazitäten C_{cb} und C_{be} sowie der Anschluß-Zuleitungsinduktivitäten (Lc, Lb, Le) in HF-Selbsterregung geraten und die Messung verfälschen

gerät verbunden (Bild 2.2a). Von diesem wird er während der Messung auf einen mittleren Arbeitspunkt eingestellt. Zwangsläufig hat aber jeder Transistor innere Kapazitäten (Sperrschichtkapazität C_{cb} zwischen Kollektor und Basis und C_{be} zwischen Basis und Emitter), hinzu kommen die unvermeidlichen geringen Zuleitungskapazitäten und insbesondere Zuleitungsinduktivitäten des Prüfanschlusses. Sie sind in Bild 2.2b mit *L*c, *L*b, *L*e angedeutet. Entsprechend den geringen *L*- und *C*-Werten ist eine solche Wirkung der Zuleitungen und inneren „parasitären Größen" des Prüflings erst bei hohen Frequenzen (im Bereich 1 ... 500 MHz) zu erwarten. Falls der Transistor bei den in Frage kommenden Frequenzen schwingfähig ist, und das trifft oft sogar auf npn-Silizium-NF-Typen zu, entsteht eine Oszillatorschaltung (Bild 2.2b). Die sich dabei aufschaukelnde HF-Schwingung bleibt bei der Messung unbemerkt, es erfolgt aber u. U. eine Gleichrichtung merklicher HF-Spannungsbeträge an der Basis-Emitterstrecke des Transistors, womit die so gleichgerichtete HF-Spannung als Richtspannung C_{be} aufladen und damit die Basisgleichspannung unkontrollierbar verändern kann. Man erhält dadurch erheblich verfälschte β-Werte! Diese Erscheinung liegt mit Sicherheit dann vor, wenn sich der meßbare β-Wert verändert, sobald der Prüfling mit der Hand berührt wird. Auf Gegenmaßnahmen ist in Abschnitt 6. hingewiesen. Ein orientierendes Beispiel, das für alle vergleichbaren npn-Siliziumtypen annähernd verallgemeinerbar ist und die Abhängigkeit des B- oder β-Wertes vom Kollektorstrom darstellt, zeigt Bild 2.3 für Transistoren der Miniplast-Typenreihen und ähnliche. Wenn der bei 20 °C (293 K) und mit Ic = 10 mA gemessene Faktor B = 1 gesetzt wird, sind aus der Kurvenschar unmittelbar die B-Veränderungen bei geänderter Halbleitertemperatur und anderen Kollektorströmen zu entnehmen. Ein Transistor, der bei 10 mA und Raumtemperatur $\beta = 100$ hat, würde mit Ic = 1 mA noch etwa $\beta = 70$, mit 0,1 mA noch $\beta = 50$ aufweisen. Bei höheren Strömen fällt der B-Faktor dagegen wieder ab.

Auch die Halbleitertemperatur, die je nach Kollektorverlustleistung in der Praxis erheblich höher als die Raumtemperatur

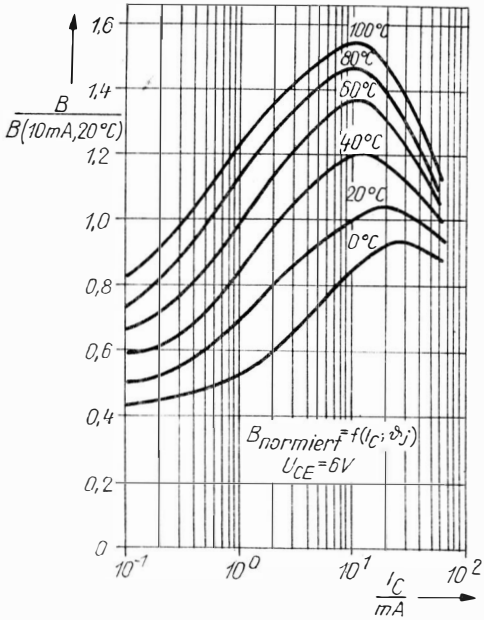


Bild 2.3 Normierter Verlauf des Stromverstärkungsfaktors B bei Silizium-Planartransistoren in Abhängigkeit von Kollektorstrom und Kristalltemperatur. Wenn an der x-Achse $I_C = 1\,A \triangleq 10^1$ gesetzt wird (angegebener I_C, 100), kann diese Darstellung auch zur überschlägigen Abschätzung bei Silizium-Planar-Leistungstransistoren dienen

sein kann, hat einen erheblichen Einfluß. Beim Anstieg von 20 °C (293 K) auf 100 °C (373 K) hätte der im Beispiel genannte Transistor bei 10 mA ein B = 150, bei 0,1 mA noch immer etwas mehr als B = 80. Auch deshalb sollte der Amateur seinen Transistorvorrat unter konstanten Bedingungen selbst ausmessen. Die später dafür empfohlenen Schaltungen verwenden durchweg (außer bei Leistungstransistoren) Kollektorströme um etwa 1 mA. Auch Bild 2.3 zeigt, daß man damit stets einen Mittelwert erfaßt, der für die Praxis genügend „Reserven" im β-Wert enthält. Bei hohen Strömen, z. B.

Schalteranwendungen, besteht also zusätzliche Sicherheit für volle Sättigung des Transistors. Bei niedrigen Strömen, z. B. Verstärkeranwendungen, beträgt der β-Rückgang gegenüber dem selbst gemessenen Wert nur zwischen 20 ... 30%, wobei sich dies mit Bild 2.3 näherungsweise abschätzen läßt. Entsprechende Abhängigkeiten bestehen im übrigen auch für Silizium-pnp-Typen und Silizium-Leistungstransistoren; auch hier ermöglicht Bild 2.3 eine Abschätzung. Bei Germaniumtransistoren besteht ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Kollektorstrom und β-Faktor, die entsprechenden Kurven verlaufen jedoch meistens erheblich flacher.

Ein großer Unterschied zwischen einzelnen Siliziumtransistoren, und zwar insbesondere zwischen den nach verschiedenen Technologien hergestellten Epitaxialplanartransistoren und „normalen" Planartransistoren, besteht in der Kollektorsättigungsspannung U_{CEsat}. Sie kann bei Silizium-npn-Typen zwischen 0,05 V und 3,5 V (!) liegen und ist natürlich, ebenso wie im vorangehenden Abschnitt für Germaniumtransistoren erläutert, stark vom Kollektorstrom abhängig, darüber hinaus aber vor allem von der Herstellungstechnologie des Transistors. Epitaxialplanartypen zeichnen sich dabei durch besonders geringe U_{CEsat} aus, sie sind daher vorzugsweise für Schalteranwendungen geeignet. So haben beispielsweise die „normalen" Planartypen folgende maximal zulässige U_{CEsat}-Werte: *SS 200*: 3 V bei 10 mA; *SF* 121: 1 V bei 50 mA; *SF 131*: 1,6 V bei 50 mA; *SC 206*: 0,6 V bei 10 mA. Demgegenüber sind für Epitaxialplanartransistoren typisch: *SF 136*: 0,3 V bei 10 mA; *SS 216*: 0,2 ... 0,3 V bei 30 mA; *SF 126*: 0,2 ... 0,5 V bei 150 mA. Die Kollektorsättigungsspannung ist nicht nur im Hinblick auf die im Transistor dabei gemäß $P_v = U_{CEsat} \cdot I_c$ entstehende Verlustleistung und als Spannungsverlust für den vom Transistor gesteuerten Verbraucher von Interesse, sondern auch im Zusammenhang mit der Ansteuerung nachfolgender Silizium-Halbleiter. Die für Silizium typische Schleusenspannung (und damit erwartungsgemäß auch U_{BE}) liegt bei etwa 0,7 V. Für sehr viele Anwendungen ist es erforderlich, daß ein Transistor kollektorseitig diesen U_{BE}-Wert unterschreitet, damit der ihm nachgeschaltete Tran-

sistor sperrt. Beim Messen des Halbleiters genügt es dann also festzustellen, ob es sich um einen Transistor mit genügend geringer U_{CEsat} handelt oder nicht. Wie Abschnitt 4.4 zeigt, läßt sich ohne genaue Spannungsmessung ein einfaches Nachweisverfahren schaffen, das angibt, ob der gesättigte Transistor genügend weit unter der für Silizium typischen Schwellenspannung von 0,6 ... 0,7 V bleibt. Da diese Unterscheidung zur Auswahl eines für Schalterzwecke geeigneten Exemplars aus vorhandenem Vorrat schon genügt, kann eine U_{CEsat}-Messung beim Amateur im allgemeinen entfallen. Eine zur Einarbeitung in diese Thematik und die Unterschiede zwischen Germanium- und Siliziumtransistoren geeignete Darstellung ist in [11] zu finden.
Silizium-Planartransistoren vertragen nur sehr geringe Basis-Emitter-Sperrspannungen. — 5 V an der Basis gegen Emitter sollten bei keinem Typ überschritten werden. Eine Ausnahme von dieser Regel ist möglich und während eines Prüf- oder Meßvorgangs kurzzeitig zulässig, wenn gewährleistet ist (z. B. durch Basisvorwiderstand), daß ein in Sperrichtung durch die Basis fließender „Durchbruchstrom" 1 ... 2 mA nicht überschreiten kann, und der Kollektorstrom ebenfalls auf wenige mA begrenzt bleibt. In diesem Fall kommt es nicht zu bleibenden Schäden am Prüfling.

2.2. Leistungstransistoren

Unter Leistungstransistoren werden hier alle Typen verstanden, die für Verlustleistungen von 1 W und mehr bzw. für Kollektorströme von 1 A und mehr zugelassen sind. Ihre Prüfung unterscheidet sich von der der Kleinleistungstransistoren nur durch entsprechend höher gewählte Kollektorströme, da die Stromverstärkung B vorwiegend bei hohen Strömen interessiert. Alle zu messenden Größen entsprechen den bereits für Kleintypen genannten. Bild 2.3 gilt sinngemäß also auch für Ströme im Bereich 10 mA ... 10 A. Die Restströme liegen bei Leistungstransistoren oft erheblich höher, die Stromverstärkungsfaktoren weit niedriger als bei Kleinleistungstypen

gleichen Materials. I_{ceo} kann bei Germaniumtypen bis 10 mA und mehr, bei Siliziumtypen immerhin noch 1 ... 2 mA betragen. I_{ceR} liegt nur dann wesentlich unter I_{ceo}, wenn R sehr klein ist (Größenordnung 10 ... 100 Ω). Das für U_{ceo} und U_{ceR} Gesagte (Bild 2.1) gilt sinngemäß ebenso für Leistungstransistoren. Auf Siliziumbasis sind Leistungstransistoren fast immer Epitaxialtypen, trotzdem muß man bei den hohen auftretenden Kollektorströmen mit relativ hohen U_{CEsat}-Werten rechnen. Da Leistungstransistoren meistens über einen weiten Kollektorstrombereich (nahezu gesamte Kennlinienlänge) ausgesteuert werden, interessiert bei ihnen, wenn 2 derartige Transistoren zu einem Verstärker-„Paar" zu kombinieren sind, auch der Verlauf der Stromverstärkung mit dem Kollektorstrom gemäß Bild 2.3 näher. Trotzdem ist es oft auch möglich, ohne Kennlinienaufnahme auszukommen und sich mit der bekannten Paarung in einem gemessenen festen Arbeitspunkt zu begnügen, wenn man einen Relativvergleich beider Kennlinien auf Übereinstimmung durchführt. Eine Variante dazu ist in Abschnitt 4.3. dargestellt. Die Stromverstärkungsfaktoren liegen teilweise auch für Siliziumtypen nur bei B-Werten um 15 ... 40. Eine Messung oder auch nur Abschätzung der maximal zulässigen Verlustleistung ist bei Leistungstransistoren nahezu unmöglich. Wenn über den Prüfling keine näheren Angaben oder Anhaltspunkte vorliegen, empfiehlt es sich, größtmögliche Kühlkörper vorzusehen und ungeachtet der Gehäusetemperaturkontrolle, die hier wieder mit den Fingerspitzen eine grobe Orientierung ermöglicht, sicherheitshalber keine höheren Kollektorströme als etwa 3 A (selbst kurzzeitig nicht) zuzulassen, auch wenn sich dabei der Transistor nur wenig erwärmt. Man bedenke, daß die maximale Belastbarkeit eines Leistungstransistors nicht nur von inneren und äußeren Wärmewiderständen (und damit von Kühlproblemen), sondern auch von der Strombelastbarkeit der Emitterstrukturen und der zur Kontaktierung des Halbleiterkristalls verwendeten Bonddrähte bestimmt wird! Eine strommäßige Überlastung kann jedoch bereits erfolgen, wenn infolge relativ geringer Kollektorspannung die maximal zulässige Verlustleistung (und Wärmeentwicklung) noch längst nicht erreicht ist! Insoweit

sollte man mit unbekannten Exemplaren also äußerst vorsichtig sein. Die Ermittlung der maximal zulässigen Kollektorspannung U_{ceo} oder U_{ceR} ist dagegen, ebenso wie bei Kleinleistungstransistoren, mit geringen Einschränkungen auch dem Amateur möglich. Hierzu gibt Abschnitt 5.1. die notwendigen Hinweise.

2.3. Feldeffekttransistoren

Alles Wissenswerte über die verschiedenen Arten von Feldeffekttransistoren, ihren Aufbau, ihre Wirkungsweise und Daten ist in [12] zu finden (Anwendungshinweise [13] [22]). Im folgenden sind nur diejenigen Daten aufgeführt, deren Ermittlung für die Praxis des Amateurs von Interesse ist. Feldeffekttransistoren werden bei offenem Gateanschluß leicht durch statische Aufladungen zerstört! Die entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang insbesondere mit MOSFET (Gatekurzschluß erst nach Einsetzen in Prüfvorrichtung entfernen usw., auch [12], [13]) seien als bekannt vorausgesetzt.

2.3.1. MOSFET

2.3.1.1. n-Kanal-Verarmungs-MOSFET

Hierzu gehören u. a. die DDR-Typen *SM 103* und *SM 104*. Außerdem sind gelegentlich datenähnliche Typen aus Importen erhältlich, deren Kenndaten [5] enthält. Die Typen *SM 103* und *SM 104* werden im gleichen Miniplastgehäuse wie die npn-Silizium-Miniplasttransistoren (SC-, SS-Typenreihen) gefertigt. Insbesondere bei der oft nicht mit Aufdruck versehenen Bastlerware bestehen also leicht Verwechslungsmöglichkeiten. Für den Amateurgebrauch wesentlich und daher zu messen sind folgende Kennwerte:
Drainruhestrom I_{DSS} (bei Gatespannung 0), Richtwert
1,5 ... 12 mA;

Abschnürspannung (Pinch-off-Spannung) U_P, Richtwert
$-1{,}5 \ldots -12$ V
sowie eventuell die
Steilheit S ($= y_{21}$) (bei I_{DSS} gemessen), Richtwert
1,0 ... 4,0 mS (mA/V).

Der Drainruhestrom I_{DSS} wird bei etwa 7 ... 10 V Drainspannung (Gate mit Source verbunden) gemessen und hängt in diesem Bereich nur wenig von der Drainspannung ab. Er läßt sich, vergleichsweise ähnlich wie bei Germaniumtransistoren I_{ceo} als Kriterium für die Gruppensortierung benutzen. Diese exemplartypische Größe kann auch innerhalb eines MOSFET-Typs stark streuen.

Die Abschnürspannung U_P wird aus meßtechnischen Gründen nicht für $I_{DS} = 0$, sondern für einen Drainstrom von etwa 10 μA angegeben. Auch sie ist eine exemplartypische Größe und daher als zweites Sortierkriterium (ähnlich den β-Gruppen bei bipolaren Transistoren) für den MOSFET-Vorrat des Amateurs geeignet.

Die Steilheit S, die funktionell am ehesten mit dem β-Faktor bei Bipolartransistoren vergleichbar wäre, ist mit Amateurmitteln nur überschlägig meßbar und als Sortierkriterium wenig geeignet. Ihr Wert ist stark abhängig vom Drainstrom. Sie nimmt mit sinkendem Drainstrom bzw. steigender Gatevorspannung erheblich ab und kann bei geringen Drainströmen weniger als 20% des bei I_{DSS} gemessenen Wertes betragen. Näheres hierzu siehe [12], [13]. In [13] sind auch die entsprechenden Kennliniendarstellungen für die MOSFET der DDR-Produktion zu finden.

Eine Messung anderer Kennwerte wie z. B. Verlustleistung, maximal zulässige Drain- und Gatespannungen, maximaler Drainstrom entfällt für den Amateur. Soweit entsprechende Grenzwerte nicht aus Datenunterlagen ([13], [5]) ersichtlich sind, kann man für n-Kanal-Verarmungs-MOSFET unbekannter Herkunft maximale Drainströme um 10 ... 15 mA, maximale Verlustleistungen um 100 ... 150 mW und maximale Drain- und Gatespannungen um $-15 \ldots -20$ V als fast immer zulässige Grenzwerte ansetzen.

2.3.1.2. p-Kanal-Anreicherungs-MOSFET

Hierzu gehören u. a. die DDR-Typen *SMY 50*, *SMY 51*, *SMY 52* und der 6fach-MOSFET *U 105 D*. Sie werden in den von integrierten Schaltkreisen bekannten DIL-Plastgehäusen verschiedener Größe gefertigt. Bei dieser Gehäuseform gilt für Anschlußskizzen, entgegen dem für Bipolartransistoren und MOSFET in Miniplastgehäusen üblichen, die Sicht von oben auf das Bauelement, ebenso wie bei Schaltkreisen! Bei diesen MOSFET interessieren den Amateur folgende zu messenden Kennwerte:

Schwellenspannung (Treshold-Spannung) U_T, Richtwert $-3 \ldots -6$ V (sie wird gewöhnlich für $I_D \approx 10$ μA angegeben) und eventuell die Steilheit S ($= y_{21}$) (meist für $-U_{DS} = -U_{GS} = -10$ V angegeben), Richtwert $\approx 2 \ldots 15$ mS.

Der Drainreststrom bei $U_G = 0$ liegt normalerweise im nA-Bereich, maximal bei etwa 0,1 μA und ist daher mit Amateurmitteln nicht meßbar. Werte über 10 μA sind als fehlerhaft anzusehen. Eine Reststrommessung entfällt daher bzw. erfolgt beim Amateur als einfache Ja/Nein-Prüfung. Weitere Kennwerte sind für den Amateur entweder unwesentlich oder mit seinen Mitteln nicht ohne weiteres zu erfassen. Ein Ausmessen und eventuelles Sortieren bezieht sich daher bei diesen MOSFET nur auf U_T, während die sonstigen Prüfvorgänge sich nur auf Funktionstests (Gateisolation, Drain-Source-Schluß usw.) beschränken.

Die Gate-Eingangswiderstände für MOSFET liegen zwischen mindestens 10^8 und im Normalfall $10^{10} \ldots 10^{12}$ Ω. Derart hohe R-Werte registrieren Amateurmittel nicht. Die Gateisolation wird daher nur auf Mindestwert geprüft und kann für den praktischen Einsatz dieses Bauelements zu $R = \infty$ angenommen werden. Es fließt also praktisch kein Gatestrom.

2.3.1.3. Andere MOSFET-Typen

MOSFET aus der DDR-Fertigung entsprechen stets einer der

beiden vorstehend genannten Arten. Aus Importen sind dem Amateur aber gelegentlich auch n-Kanal-Anreicherungs-MOSFET oder p-Kanal-Verarmungs-MOSFET zugänglich. Sie unterscheiden sich von den vorgenannten nur durch die umgekehrt gepolte Drainspannung. Beachtet man die richtigen Betriebsspannungspolaritäten, werden demzufolge p-Kanal-Verarmungstypen ebenso wie n-Kanal-Verarmungstypen und n-Kanal-Anreicherungstypen ebenso wie p-Kanal-Anreicherungstypen geprüft. Näheres hierzu siehe in [12]. Für den Amateur haben diese Typen im allgemeinen wenig Bedeutung.

2.3.2. Sperrschicht-FET (SFET)

Sperrschicht-FET werden in der DDR nicht gefertigt, sind aber recht häufig aus Importen erhältlich. Ihre Daten enthält ebenfalls [5], der Aufbau und die Anwendung ist in [12] dargestellt. Wie sich aus ihrem Aufbau ergibt, sind Sperrschicht-FET stets Verarmungstypen (Sperrschicht-FET vom Anreicherungstyp mit $I_{DSS} = 0$ gibt es nicht!). Die Gateisolierung bildet ein in Sperrichtung betriebener pn-Übergang, was bei der Prüfung zu beachten ist und ein Unterscheidungskriterium gegenüber Verarmungs-MOSFET darstellt. Das Gate eines SFET weist bei falsch gepolter Gatevorspannung Dioden-Durchlaßcharakteristik auf, bei MOSFET besteht auch dann kein Durchgang. Insoweit gibt es also bei Verarmungs-MOSFET keine „falsch" gepolte Gatespannung! Allerdings ist Betrieb der Gatediodenstrecke bei SFET in Durchlaßrichtung vom Hersteller meist nicht zugelassen. Bei entsprechenden Prüfungen muß man mit sehr geringen Prüfströmen (maximal 50 μA sind unbedenklich möglich) arbeiten. Im Zweifelsfall läßt sich also ein SFET von einem MOSFET dadurch unterscheiden, daß die Gate-Sourcestrecke auf Diodenverhalten (Stromdurchlaß in nur einer Polarität) geprüft wird. Dabei ist die Prüfspannung zwischen 2 ... 5 V zu wählen und der fließende Strom auf maximal etwa 50 μA mit Vorwiderstand zu begrenzen. Am einfachsten gelingt das mit dem auf den

entsprechenden Spannungsbereich geschalteten Vielfachmesser, der dabei zugleich als Stromflußindikator dient. Diese scheinbar recht einfache Unterscheidungsmöglichkeit zwischen SFET und MOSFET kann allerdings bei einigen MOSFET-Typen zu Irrtümern führen (Bild 2.4). Bekanntlich werden MOSFET zum Schutz des Gates gegen statische Aufladungen, die anderenfalls bei offenem Gateanschluß schon durch bloßes Berühren oder geringe Reibung mit nichtleitendem Verpackungs- oder Isolationsmaterial zur Zerstörung der Gateisolation führen können, sehr häufig mit integrierten Z-Dioden versehen, die zwischen Gate und Substrat (Bulk) oder Source geschaltet und bei normaler Gatevorspannung in Sperrichtung gepolt sind. Diese Z-Diode ist so bemessen, daß ihre Z-Spannung etwas über der maximal zulässigen Gatevorspannung liegt. Bei zu hohen Gatespannungen wird die Z-Diode leitend und beseitigt statische Aufladungen bzw. andere stromschwache Überspannungen. Die Strombelastbarkeit derartiger Schutzdioden liegt meist noch unter 0,1 mA! Bei einem so geschützten MOSFET beginnt aber bei falsch gepolter Gatespannung die Z-Diode in Durchlaßrichtung bereits bei etwa 0,6 ... 0,7 V zu leiten! Sie kann so eine nicht vorhandene Gate-Sperrschicht und damit einen SFET vortäuschen. Bei dem in Bild 2.4a dargestellten n-Kanal-SFET wird die Gate-Source-Sperrschicht während der oben genannten Prüfmethode durchlässig, wenn Pluspol der Prüfspannung am Gate liegt. Bei umgekehrter Polung sperrt diese Gatediode. Bei SFET übernimmt sie übrigens in begrenztem Maße zugleich die Funktion der bei MOSFET getrennt integrierten Gateschutzdiode. Ihr Sperrstrom liegt weit unter 0,1 μA und

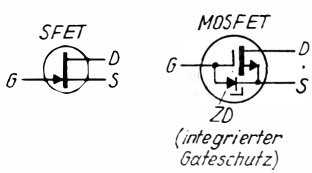


Bild 2.4
a — n-Kanal-SFET;
b — p-Kanal-Verarmungs-MOSFET mit integrierter Gateschutzdiode

ist mit Amateurmitteln im Normalfall nicht mehr meßbar. Auch der mit Gateschutzdiode versehene MOSFET (Bild 2.4b) weist mit negativer Prüfspannung am Gate nur den ebenfalls weit unter 0,1 μA liegenden Z-Dioden-Sperrstrom auf. Mit Pluspol am Gate wird ZD in Durchlaßrichtung betrieben. Dieser MOSFET verhält sich daher bei der erwähnten Prüfung genauso wie der daneben dargestellte SFET! Tatsächlich ist mit Amateurmitteln und wenn jegliche Angaben oder Anhaltswerte zu dem Prüfling fehlen, die Unterscheidung zwischen einem SFET und einem MOSFET vom Verarmungstyp mit integrierter Gateschutzdiode nicht möglich. Man benutzt einen solchen FET dann zweckmäßig als SFET, sofern weitere meßbare Daten das zulassen. Eine Unterscheidung ist dagegen möglich, wenn der MOSFET ein Anreicherungstyp ist (*SMY 50 ... 52* und *U 105 D*). Dieser Typ zeigt mit Gatespannung $U_{GS} = 0$ bekanntlich $I_{DS} = 0$. Fließt ohne Gatespannung kein Drainstrom, so kann es sich (da SFET nur vom Verarmungstyp sein können, also stets einen Drainruhestrom I_{DSS} aufweisen) nur um einen MOSFET mit integrierter Gateschutzdiode handeln.

Im übrigen werden SFET ebenso gemessen wie die Verarmungs-MOSFET vom entsprechenden Kanalleitungstyp, sinngemäß also nach Abschnitt 2.3.1.1. und Abschnitt 4.5., eventuell mit umgepolter Betriebsspannung. Die beim SFET zu ermittelnden Kennwerte sind demzufolge die gleichen wie in Abschnitt 2.3.1.1. aufgeführt. SFET weisen oft höhere Steilheiten auf als Verarmungs-MOSFET und sind gelegentlich auch für den Amateur preiswert erhältlich. Unter anderem deshalb ist die Frage der Austauschbarkeit von SFETs gegen MOSFET oder umgekehrt (insbesondere *SM 103*, *SM 104* gegen n-Kanal-SFET und umgekehrt) für den Amateur von besonderem Interesse. Hinweise dazu enthält u. a. [13]. Im Einzelfall kann dies nur an Hand der jeweiligen Schaltung, in der der Typenaustausch erfolgen soll, und durch Vergleich sowohl der vom Hersteller angegebenen Kenndaten als auch der vom Amateur selbst ermittelten Exemplarmeßwerte entschieden werden. Bei HF-Schaltungen bringt oft erst die Einsatzerprobung in der vorgesehenen Schaltung Klarheit.

2.4. Thyristoren und Triac

2.4.1. Kleinleistungstypen

Unter Kleinleistungstypen sollen hier solche Thyristoren und Triac verstanden werden, deren Nennstrom (maximal zulässiger Dauergleichstrom) $\lesssim 3$ A ist. Hierzu zählen Thyristortypen wie *ST 103*, *KT 501* ... *KT 505* und viele ähnliche. Grundsätzliches über Aufbau, Funktionsweise und Anwendungen von Thyristoren und Triac enthalten [14], [15], [16], wo auch Bauformen und einige typische Anschlußlagen dargestellt sind. Für den Amateur nicht meßbar ist einerseits die maximal zulässige Strombelastbarkeit. Sie kann nur nach Gehäusebauform, Gehäusegröße, Anschlußgestaltung und Herkunft oder dem industriell üblichen Verwendungszweck abgeschätzt werden. Thyristoren in transistorähnlichen Gehäusen sind für höchstens 0,5 ... 1 A geeignet, andere Bauformen lassen sich ggf. durch Vergleich mit den Baugrößen der DDR-Typenreihen ST ... und ihren Nenndaten beurteilen. Es ist auch nicht möglich, das Frequenzverhalten bzw. die Schaltgeschwindigkeit (maximal zulässige Spannungs- und Strom-Anstiegsgeschwindigkeiten, Freiwerdezeit) zu ermitteln. Letztere Kennwerte haben allerdings für Amateuranwendungen im allgemeinen kaum Bedeutung.

Für den Amateur interessante und zu messende Exemplarkennwerte sind neben der maximal zulässigen Sperr- und Blockierspannung vor allem:

erforderlicher Mindestzündstrom
(Gatestrom $I_G = 10 \ldots 100$ mA);
Mindestzündspannung (Gatespannung $U_G = 1{,}5 \ldots 3{,}5$ V);
minimaler Haltestrom ($I_H = 10 \ldots 500$ mA) und der
Durchlaß-Spannungsabfall im leitenden Zustand
($U_F = 1{,}8 \ldots 4$ V).

Alle angegebenen Richtwerte können relativ stark streuen. Hochwertige Exemplare weisen in allen Kenngrößen besonders niedrige Werte auf. Die erforderlichen Mindestwerte von U_G und I_G hängen außer vom Typ im wesentlichen von der jeweils angewendeten Anodenbetriebsspannung sowie merklich von

der Kristalltemperatur des Thyristors ab. U_G und I_G sinken mit steigender Betriebsspannung und Temperatur. Der Durchlaßspannungsabfall ist außer von Typ und Exemplar vom durchfließenden gesteuerten Anodenstrom abhängig. Er geht dem geschalteten Verbraucher verloren und ergibt mit dem Stromfluß durch den Thyristor die in ihm freigesetzte Verlustleistung. Deshalb sind niedrige Durchlaßspannungen günstig. Gerade für den Amateur von Interesse ist der minimale Haltestrom I_H. Dabei handelt es sich um denjenigen Strom, bei dem der durchgeschaltete Thyristor (nach Abschalten der Gatespannung mit $U_{GK} = 0$) gerade noch geöffnet bleibt. Wird I_H unterschritten, so kippt der Thyristor in den Sperrzustand (Blockierzustand) zurück. Ein Thyristor kann auch mit geringerem Strom als I_H noch geöffnet bleiben, solange ein Gatestrom fließt. Dabei verhält er sich näherungsweise wie ein bipolarer Leistungstransistor (mit Gatestrom vergleichsweise $\triangleq$ Basisstrom, Anodenstrom vergleichsweise $\triangleq$ Kollektorstrom) und weist oft in diesem Zustand erheblich erhöhte Durchlaßspannung auf. Er ist für den Thyristor zwar zulässig, für die mit ihm betriebene Schaltung jedoch u. U. ungünstig. Praktisch bedeutet dies, daß der vom Thyristor gesteuerte Verbraucher mit seiner Stromaufnahme stets gewährleisten muß, daß I_H überschritten wird. Im Hinblick auf die vom Thyristor zu schaltende *Mindest*verbraucherleistung ist deshalb die Kenntnis des I_H-Exemplarwerts oft sehr wichtig, wenn der Thyristor in der vorgesehenen Schaltung stabil arbeiten soll. Ein Thyristor mit $I_H = 500$ mA wäre beispielsweise zur Ansteuerung einer 220 V/25-W-Lampe ($I_{La} \approx 0{,}12$ A) nicht mehr ohne weiteres geeignet, die Lampe würde jeweils nach Aussetzen des Gatezündstroms sofort wieder verlöschen. Triac arbeiten im Gegensatz zu Thyristoren in beiden Polungen der Betriebsspannung (das gilt auch für die Gatespannung!). Sie werden im übrigen vom Amateur ebenso und nach den gleichen Kennwerten geprüft wie Thyristoren. Eine Unterscheidung zwischen Thyristor und Triac ist möglich, indem man bei den später gezeigten Prüfschaltungen probeweise Katoden- und Anodenanschluß des Bauelements vertauscht. Gateanschluß und Gatespannungspolung sind dabei nicht zu

ändern, da ein solcherart falsch gepolter Thyristor nicht zündet; ein Triac zündet auch in dieser Anschlußweise. Die für einen Triac zu ermittelnden Kenngrößen werden für beide möglichen Polungen der Hauptanschlüsse aufgenommen. Sie sind je nach Typ, Exemplar und Qualität sehr unterschiedlich, was außer für die Zünddaten U_G, I_G vor allem für den Durchlaßspannungsabfall und den Mindesthaltestrom gilt. Für die spätere Verwendung des Triac ist es günstig, sicherheitshalber jeweils die höheren Werte vorauszusetzen. Falls man bei unbekannten Triacs nicht weiß, welchem Hauptanschluß (vergleichsweise entsprechend Katode beim Thyristor) das Gate zuzuordnen ist, wird durch Messungen ermittelt, mit welchem Hauptanschluß zusammen der Triac die niedrigeren Gate-Betriebswerte ergibt. Dieser Hauptanschluß ist dann der Bezugspol für die Gateansteuerung des Triac. Bei hochwertigen Triacs unterscheiden sich die Kennwerte (in beiden möglichen Polungen der Hauptanschlüsse) für U_G und Durchlaßspannungsabfall höchstens um den Faktor 1,5 ... 2; für I_G bis maximal etwa 1:4, für I_H bis etwa 1:3.

2.4.2. Leistungstypen

Hierunter sollen alle Thyristor- und Triactypen verstanden werden, deren Nennstrom > 3 A ist. Grundsätzlich gilt alles vorstehend Gesagte auch für deren Prüfung und Messung. Es ist jedoch mit u. U. erheblich höheren Werten für Haltestrom I_H ($\geq$ 0,3 A) und Zündstrom I_G (0,1 A und mehr) zu rechnen, während Gatezündspannung U_G und Durchlaßspannungsabfall (bei entsprechend höherem Nennstrom!) etwa den für Kleinleistungstypen bereits genannten Werten nahekommen. Es besteht also zwischen den Messungen von Exemplaren beider Leistungsgruppen kein grundsätzlicher Unterschied. Leistungsthyristoren sind meist nur mit den für sie vorgesehenen recht voluminösen Kühlkörpern verwendbar, da in ihnen entsprechend hohe Verlustleistung auftritt. Mit einem Nenndauerstrom von z. B. 10 A und 3 V Durchlaßspannungsabfall werden im Thyristor rund 30 W Verlustleistung frei! Für ge-

ringere Ströme lassen sich diese Thyristoren oft auch ohne Kühlkörper nicht verwenden, da exemplarbedingt sehr unterschiedlich hohe Halteströme I_H auftreten. Bei Thyristoren der Typenklassen > 10 A können sie bis nahe 1 A liegen. Der maximal zulässige Spitzenstrom (Stoßstrombelastung, beim Amateur z. B. im Zusammenhang mit Kondensatorentladungen von Interesse) ist mit Amateurmitteln nicht zu ermitteln. Für derartige Anwendungen kann man bei den meisten Thyristortypen den mindestens 15 ... 20fachen Wert (z. T. weit mehr, jedoch nicht bei unbekannten Typen!) des Nenndauergleichstroms zulassen, wenn die Stromanstiegsgeschwindigkeit begrenzt ist. Näheres dazu siehe in [14]. Die Datenblätter des Herstellers geben hierfür stets zusätzliche Werte an.

2.5. Dioden

2.5.1. Kleindioden

Unter Kleindioden werden hier alle üblichen Diodentypen für maximale Durchlaßströme $< 0{,}1$ A verstanden, wie sie als Germanium- oder Siliziumdioden für viele schaltungstechnische Zwecke bekannt sind. Die Prüfung sollte sich auf das Sperr- und das Durchlaßverhalten sowie ggf. bei unbekanntem Typ auf die Unterscheidung Germanium/Silizium beschränken. Messungen des Schaltverhaltens (Sperrverzögerung) oder der HF-Eignung sind mit Amateurmitteln nicht sinnvoll und für seine Zwecke auch überflüssig. Diese Größen prüft der Bastler jeweils direkt im realen Einsatzfall. Ob es sich um Germanium oder Silizium handelt, läßt sich an Hand der unterschiedlichen Schwellenspannung und des Sperrstromverhaltens ermitteln. Zu den entsprechenden Typengruppen gehören neben vielen anderen u. a. die SAY-Typenreihen (Silizium) und die GA- und GAY-Typenreihen (Germanium). Die maximale Strombelastbarkeit kann nur mit der unzuverlässigen Faustregel, daß bei derartigen Kleindioden der zulässige Maximalstrom vorliegt, wenn die über der Diode abfallende Durchlaßspannung etwa 0,9 ... 1,2 V erreicht, abgeschätzt

werden. Bei unbekannten Typen sollte man unabhängig davon sicherheitshalber 30 mA niemals überschreiten.
Selen-Kleindioden sind oft nur mit 2 ... 5 mA belastbar, was bei eventuellen Versuchen zu beachten ist. Meßmöglichkeiten für Sperrspannungsmessung an Dioden sind in Abschnitt 5.1. zu finden.

2.5.2. Gleichrichterdioden

Hierunter fallen alle Dioden für Dauerdurchlaßströme $\geq 0{,}1$ A. Sie werden vorzugsweise für Stromversorgungs- und Leistungsgleichrichterschaltungen verwendet und sind bei den meisten Herstellern nach ihrem zulässigen maximalen Dauerdurchlaßstrom, und innerhalb einer solchen Typengruppe nach maximal zulässigen Sperrspannungen, gestaffelt. Üblich sind Diodengruppen bzw. Typenreihen für z. B. 0,1 A, 1 A und 10 A (bei ausländischen Herstellern auch Zwischenwerte). Bauformen $>$ 10 A haben für den Amateur selten Bedeutung (handelsüblich bis 200 A und mehr!). Die maximal zulässige Strombelastbarkeit läßt sich allenfalls grob an der Gehäusebauform abschätzen. Der Amateur braucht sich bei diesen Dioden nur für die Prüfung des Sperr- und Durchlaßverhaltens sowie die Unterscheidung Germanium/Silizium zu interessieren. Sie werden heute nur noch in Siliziumtechnik gefertigt, der Bastler besitzt sie aber noch als Germaniumdioden, die wegen ihres geringeren Durchlaßspannungsabfalls oft Vorteile bieten. Außerdem kann der Amateur bei unbekannten Dioden noch mit gewissen Einschränkungen die maximal zulässige Sperrspannung (Abschnitt 5.1.) ermitteln. Letzteres ist insbesondere zur Klassifizierung ungetypter Bastlerware notwendig.

2.5.3. Z-Dioden

Z-Dioden sind stets Siliziumdioden und verhalten sich in Durchlaßrichtung gepolt wie Kleindioden. Bei ihnen wird den

Amateur im allgemeinen die genaue Ermittlung der Z-Spannung und die Belastbarkeit interessieren. Z-Dioden sind als Kleindioden ($P_{tot} \lesssim 250$ mW) und Leistungs-Z-Dioden ($P_{tot} \approx 1$ W) üblich; letztere müssen oberhalb etwa der halben Nennleistung im allgemeinen bereits mit Kühlblech versehen sein. Die mögliche Belastbarkeit läßt sich grob nach der Bauform abschätzen. Übliche Z-Spannungen liegen zwischen etwa 5 ... 25 V. Aus Importen erhält man auch Z-Dioden im Bereich 2,4 ... 4,7 V. Z-Dioden für 0,7 ... 1 V sind strenggenommen keine Z-Dioden, sondern auf entsprechend günstigen Kennlinienverlauf ausgewählte normale, in Durchlaßrichtung (!), betriebene Silizium-Kleindioden. Mißt der Amateur gelegentlich höhere Z-Spannung als 27 V, so kann es sich entweder um eine defekte Z-Diode oder um eine ganz normale Silizium-Kleindiode handeln, deren Sperrspannung bereits überschritten ist und die im Durchbruchgebiet arbeitet. Dies wäre am deutlich „abgerundet" verlaufenden Kennlinienknick in Nähe der Z-Spannung erkennbar. Es ist also keine echte Z-Diode zu erkennen, wenn sich bei einer Diodenstromänderung zwischen 1 ... 3 mA die Z-Spannung um mehr als 15% ändert.

Die Z-Spannungsmessung (Abschnitt 5.1.) kann prinzipiell nach Bild 2.5 erfolgen, wobei statt der in Abschnitt 5.1. benutzten hohen Meßspannung hier demzufolge bereits mit einer unkritisch zu handhabenden Meßspannung U_m von etwa 40 V auszukommen ist. R_v soll so bemessen sein, daß ein maximaler

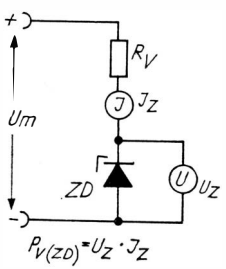


Bild 2.5
Prinzipschaltung zur Datenermittlung an Z-Dioden

Strom I_z von etwa 10 mA (für Kleindioden) nicht überschritten werden kann (für $U_m \approx 40$ V wäre R_v mit etwa 3,3 ... 3,9 kΩ zu bemessen). Mit Vielfachmesser (nacheinander bei I und U einzuschalten), lassen sich die interessierenden Größen I_z und U_z des Prüflings ZD messen. Da sich die in ZD umgesetzte Verlustleistung nach der mit angegebenen Beziehung ergibt, kann man den für diese Diode maximal zulässigen Strom I_z errechnen, wenn U_z und die für ZD zulässige Maximalbelastbarkeit bekannt ist oder geschätzt wurde. Bei der praktischen Verwendung sollte diese Z-Diode dann mit dem etwa 0,3 ... 0,5fachen Wert des so bestimmten I_z, mindestens aber mit etwa $0{,}1 \cdot I_z$ betrieben werden, um beste Stabilisierungswirkung (Minimum des dynamischen Widerstands r_z der Z-Diode) zu erreichen.

Behelfsweise kann man auch die Basis-Emitterstrecke normaler npn-Silizium-Planar- (oder Epitaxialplanar-) Transistoren als Z-Diode kleiner Leistung benutzen. Dabei ist allerdings eine nicht sehr gute Stabilisierungswirkung bzw. gegenüber regulären Z-Dioden ein merklich größerer dynamischer Widerstand r_z zu verzeichnen. Geeignet sind alle üblichen Silizium-Kleintransistoren (SC- und SF-Typenreihen u. ä.), wobei die Basis des npn-Transistors statt Anode der Z-Diode anzuschließen ist (Kollektor bleibt frei). Die Basis-Emitterstrecke wird dabei im „verbotenen" Sperrspannungsdurchbruchbereich betrieben, in dem diese Transistoren eine der Z-Diode sehr ähnliche Charakteristik aufweisen. Die Durchbruchsspannung der gesperrten Basis-Emitterstrecke der genannten Transistoren und damit U_z dieser Behelfslösung, liegt meist bei etwa 6,5 ... 8,5 V. Für diesen Ersatz sollten jedoch 5 ... 8 mW Verlustleistung nicht überschritten werden, womit I_z für diesen Fall auf maximal 1 mA (Mindestwert 0,1 mA) begrenzt ist. Unter dieser Voraussetzung ist eine Zerstörung des Transistors nicht zu erwarten. Möglich sind jedoch bleibende Datenänderungen (insbesondere β und U_{CEsat}), die bei Verwendung als Z-Diode nicht interessieren. Den Transistor sollte man aber später nicht mehr anderweitig als Transistor verwenden. Die Messung des Exemplar-U_z-Wertes kann nach Bild 2.5 mit $U_m \approx 12$ ... 15 V und $R_v \approx 10$ kΩ erfolgen.

2.5.4. Diacs und Vierschichtdioden (VD)

Vierschichtdioden sind ebenso wie Diacs Bauelemente mit Kippverhalten. Eine Vierschichtdiode (im weiteren VD genannt) sperrt unterhalb ihrer „Zündspannung" U_z in beiden Polungen, weist also in beiden Richtungen keinen oder fast keinen Durchgang auf. Sie ist stets auf Silizium-Basis gefertigt und hat daher unterhalb ihrer Zündspannung einen Reststrom von maximal etwa 0,1 μA. Sobald U_z erreicht ist, beginnt dieser Reststrom merklich anzusteigen, wird danach gering weiter erhöht und schaltet die VD durch. Bei vollem Durchgang ist nur noch ein bei 1 ... 4 V liegender Restspannungsabfall zu verzeichnen. Der durch VD fließende Strom hält sie geöffnet, solange er nicht einen Mindestwert (Haltestrom I_H — wie bei Thyristoren) unterschreitet, bei $I < I_H$ kippt die Diode wieder in den Sperrzustand zurück. Die für den Anwender interessanten Größen der VD sind somit die Zündspannung U_z (15 ... 150 V) und der Haltestrom I_H (0,1 ... 10 mA). In Klammern sind durchschnittliche Richtwerte für die handelsüblichen Typen angegeben. Die meisten Hersteller fertigen VD-Typenreihen nach bestimmten U_z-Gruppen gegliedert. Die gebräuchlichsten U_z-Werte liegen bei 20 ... 35 V. I_H kann stark exemplarabhängig sein. U_z läßt sich gemäß Abschnitt 5.1.2. ermitteln. Den für die meisten Anwendungen nicht interessierenden Haltestrom kann man mit einer Schaltung nach Bild 4.13 ebenso wie bei Thyristoren ermitteln. Die Betriebsspannung und der Wert für P2 sind in Bild 4.13 entsprechend dem U_z-Wert der VD zu vergrößern; Anschluß G bleibt unbenutzt, S1 offen. Eine VD läßt sich funktionell mit 2 komplementären Transistoren nachbilden ([1] und [17] geben Beispiele) und auf diesem Weg auch fast immer vollwertig ersetzen. VD stehen dem Amateur nur begrenzt aus Importen zur Verfügung.

Das Bauelement Diac ist wie die VD ein Zweipol und verhält sich wie diese, ist jedoch in beiden Polaritäten zu betreiben. Insoweit verhält sich die VD zum Diac wie der Thyristor zum Triac. Demzufolge prüft man auch den Diac ebenso wie vorstehend für VD erläutert und auf die gleichen Kennwerte.

Die Werte für U_z und I_H sind beim Diac in beiden Polungen etwas verschieden. Die Differenz der U_z in beiden Polungen kann maximal etwa 30% betragen. Höhere Differenzen sind unnormal. Unterscheiden sich U_z in beiden Polungen um mehr als 1:2, so handelt es sich meist um eine VD. Die Polung im praktischen Einsatz ist beim Diac im allgemeinen gleichgültig, nicht aber bei der VD. Sie kann in verschiedenen Schaltungsanwendungen (u. a. bei Verwendung als Zündschaltung für Thyristoren) bei Falschpolung zerstört werden. Wenn die richtige Polung nicht bekannt ist, sollte man sie bei der U_z-Messung mit bestimmen. Als richtige Polung gilt stets diejenige mit dem geringeren Wert für U_z.

VD und Diac sind im allgemeinen äußerlich nicht von normalen Dioden zu unterscheiden (annähernd gleiche Bauformen und Gehäuse). Gibt die Typenbezeichnung keinen Aufschluß, sind VD und Diac, wie vorstehend erwähnt, zwischen beiden Bauelementen und normalen Dioden nach den in Abschnitt 4.8. und Abschnitt 5.1. gegebenen Hinweisen zu unterscheiden. Besitzt der Amateur gelegentlich ein Bauelement, das dem Aussehen nach offensichtlich eine Diode ist, jedoch bei normaler Dioden-Durchgangsprüfung in keiner Polarität Durchgang zeigt, so kann es sich außer um eine defekte Diode u. U. auch um eine VD oder einen Diac handeln. Im Zweifelsfall lohnt sich also eine entsprechende Prüfung.

Eine häufige Fehlerquelle bei VD und Diac ist ein zu großer Reststrom bzw. Vorstrom (gemessen bei einer Spannung, die etwa 10% unter U_z liegt), der in manchen Schaltungen das Auslösen des Kippvorgangs verhindert. Bei guten VD und Diacs liegt der Vorstrom (bei $\approx 0{,}9 \cdot U_z$ gemessen) unter 20 ... 50 μA. Der maximal zulässige Durchlaß-Dauergleichstrom ist je nach Typ unterschiedlich, bei unbekannten Daten sollten 20 mA nicht überschritten werden. Für Kondensatorstoßentladungen (Thyristor- oder Triaczündschaltungen) geben die Hersteller maximal zulässige Stoßstromwerte in den Datenblättern an. Bei unbekannten Daten darf man 100 ... 150 mA (bzw. bei Kondensatorentladungen in Zünd- oder Kippschaltungen ohne strombegrenzenden R und U_z-Werten um 30 V maximale C-Werte um 0,2 μF) sicherheits-

halber nicht überschreiten. Für selbstgefertigte VD-Ersatzschaltungen aus komplementären Transistoren sind natürlich die Grenzdaten der dabei verwendeten Transistoren maßgebend. Falsch gepolte VD werden bereits durch geringe Ströme zerstört. Für Meßzwecke ist Falschpolung bei kurzzeitigen Strömen bis maximal 1 mA für 1 ... 2 Sekunden zulässig.

3. Hinweise für die Ermittlung von Halbleiterart und Anschlußlage bei Bauelementen unbekannter Herkunft

3.1. Erste Abschätzung nach äußeren Merkmalen

Gelegentlich hat der Amateur mit Halbleiterbauelementen zu tun deren Typenaufdruck unleserlich oder nicht vorhanden ist, und von denen oft nicht einmal Bestimmungszweck und Herkunft bekannt sind. Um Art und Eigenschaften bzw. Daten solcher „unbekannter Objekte" ermitteln zu können, sollte man folgende Hinweise beachten. Der ratsuchende Leser sei hier jedoch gleich eingangs vor übertriebenen Hoffnungen gewarnt: Bei der jetzt üblichen Vielfalt von Halbleiterarten und Typen gibt es (wenn alle Anhaltspunkte fehlen) auch für den Fachmann kein „Patentrezept", das es ermöglichen würde, einen völlig unbekannten Halbleiter mit Sicherheit nach Art, Bestimmungszweck, richtiger Anschlußweise oder gar allen Daten und Kenngrößen zu analysieren, ohne dabei eventuell den Prüfling zu zerstören. Die Zerstörungsgefahr bei Prüfversuchen ist für den Amateur einerseits besonders groß, zum anderen als Risiko besonders unangenehm, weil das Objekt ja im allgemeinen nur in einem oder sehr wenigen Exemplaren vorhanden sein wird. Von vornherein nahezu aussichtslos ist unter diesen Umständen die Datenermittlung von Objekten, die mehr als maximal 4 Anschlüsse aufweisen (integrierte Schaltkreise!) und keinerlei Anhaltspunkte bezüglich Herkunft, Hersteller oder Zugehörigkeit zu einer Bauelemente-„Familie" vorliegen. Bauelemente mit mehr als 4 Anschlüssen sind daher im folgenden nicht berücksichtigt. Aber auch bei „einfachen" Halbleiterbauelementen ähnelt die Kennwert- und Anschlußermittlung einer fast kriminalistischen Denksportaufgabe. Man hat es ja praktisch mit einer „black box" zu tun, in der praktisch alles an herkömmlichen Halbleitern und deren Kombinationen enthalten sein kann, und die obendrein die unangenehme Eigenschaft hat, bei falscher Anschlußpolung oder falsch gewählten Strömen und Span-

nungen entweder „nichts zu sagen" oder bereits durch Überlastung zerstört zu werden. Ein Plastgehäuse mit 4 Anschlüssen ermöglicht u. a.: ein MOSFET, ein Doppel-MOSFET, eine Kombination mehrerer einfacher Siliziumdioden, ein Optokoppler usw. Wichtigste Voraussetzung, um eine solche Aufgabe mit einiger Erfolgsaussicht zu lösen, ist deshalb eine genügende Kenntnis aller „gängigen" Halbleiterarten und ihrer Funktionsweise, ihrer typischen Kenndaten und praktischen Verwendung. Dazu gehört die Kenntnis möglichst vieler praktisch gebräuchlicher Halbleiter-Gehäusebauformen aus eigenem Ansehen, Grundkenntnis der gebräuchlichsten Herstellungstechnologien für Halbleiter, ihre Gehäuse und nicht zuletzt das Vermögen, die vorhandene Fachkenntnis hierbei ideenreich anzuwenden. Zunächst einmal muß durch streng logische Überlegung festgelegt werden, welche Halbleiterarten in Frage kommen, welche wahrscheinlich oder sicher ausscheiden, wie bei solchen Halbleitern, die dem „vermuteten" Typ ähnlich sein könnten, im Durchschnitts- oder Normalfall die gebräuchlichsten Anschlußlagen und die niedrigsten zulässigen Grenzwerte sind usw. Hieraus läßt sich dann oft schon so etwas wie ein „Arbeitsplan" für die ersten orientierenden Vorversuche ableiten, mit denen man seine Vermutungen einengt und erste Anhaltspunkte gewinnt. Erst dann wird mit ersten praktischen Vorversuchen begonnen! In diesem Stadium ist das gezielte „Hineindenken" in den (vermuteten) Halbleiteraufbau im Sinne einer Analyse auf möglichst einfache, von außen zugängliche Strompfade sehr wichtig. Diese „Durchgangspfade" sind dabei meist Ohmsche Widerstände oder Diodenstrecken oder man kann sie als solche auffassen. Teilskizzen in Gestalt von „Innenschaltungsauszügen" des Objekts können dabei von Schritt zu Schritt wertvoll als Gedankenstütze und Kombinationshilfe sein. Die folgenden Abschnitte zeigen dafür einige Beispiele. Entscheidend ist jedoch das systematische Vorgehen. Ein „Ausprobieren auf Verdacht" (Beschalten von Anschlüssen von denen nicht genau bekannt ist, was ihnen „innen" folgt, mit Strömen oder Spannungen), ist nicht nur nahezu aussichtslos, sondern auch fast immer mit Zerstörung des Prüflings verbunden. Aus diesem

Schaden kann man nicht einmal mehr etwas lernen, denn danach ist ja nicht mehr festzustellen, was zerstört wurde und warum!

Zunächst erlauben Gehäusematerial (Plast, Metall usw.) und Bauform (ähnlich Transistor, ähnlich Schaltkreis, ähnlich Leistungsdiode, ähnlich Kleindiode usw.) zusammen mit der Anschlußzahl schon gewisse Rückschlüsse. Dabei ist zu beachten, daß einerseits ein Metallgehäuse bereits einen Anschluß darstellen kann (z. B. Kollektor bei Leistungstransistor, Anode bei Thyristor usw.), dies aber bei ausländischen Bauformen durchaus nicht so sein muß. Es sind z. B. Diacs bekannt, die in der Gehäuseform einem Leistungstransistor (*GD 240*, *OC 26*, *3NU74* u. ä. Formen) zum Verwechseln ähnlich sehen, jedoch statt Emitter und Basis nur die 2 Diac-Anschlüsse haben und mit niedrigen Prüfspannungen nirgends Durchgang zeigen, denn das Gehäuse dient bei diesen Diacs nur der Montage! Metallgehäusen sieht man oft an, ob sie für Anschlußmontage vorgesehen sind (Lötfahnen, direkt am Metall kontaktierte Drähte, Schraub- oder Befestigungslöcher). Bei denen das offenbar nicht so ist (Transistorstandardgehäuse *TO 5*, *TO 7* u. ä.) können andererseits die Gehäuse als Abschirmung bestimmt und zum Kontaktieren mit einem zusätzlichen scheinbar vom Gehäuse isolierten Draht herausgeführt sein (HF-Transistor *GF 140* u. ä. als Beispiel!). Besondere Verwechslungsgefahr besteht bei den Miniplastgehäusen der DDR-Produktion, wenn der Typenaufdruck fehlt. Hier sind npn-Siliziumtransistoren und die am Gate extrem empfindlichen (intern ungeschützten) MOSFET *SM 103*, *SM 104* äußerlich völlig bauformgleich! Das Objekt ist dabei vorsorglich zunächst als MOSFET zu „vermuten" und zu prüfen, erst danach als Bipolartransistor oder Mehrfach-Silizium-Kleindiode; nicht umgekehrt! Mit ähnlichen Überlegungen versucht man zunächst grob die Bauelemente-„Familie" zu ermitteln. Dies ist bei ausländischen Bauformen oft besonders schwierig und mehrdeutig. Bezüglich ausländischer Bauelemente sei dabei geraten, auf eventuell vorhandene Typenbezeichnungen (die orientieren, aber auch gründlich *des*orientieren können) nicht allzuviel Gewicht zu legen. Wie schon ein Blick in [5]

zeigt, sind einander sehr ähnliche Typenbezeichnungen keineswegs immer Merkmal für einander ähnliche Halbleiter, im Gegenteil können z. B. Transistoren, deren Typenbezeichnung bis auf eine einzige Ziffer oder einen einzigen Zusatz in der Bezeichnung übereinstimmen, grundsätzlich verschieden sein (Bipolartyp/FET-Typ) und sogar oft von verschiedenen Herstellern stammen. Findet man also nicht in [5] oder anderen Datensammlungen exakt die vollständige Typenbezeichnung des unbekannten Objekts, sondern nur eine „sehr ähnliche", so betrachtet man die Typenbezeichnung besser als nicht existent! Das größte Risiko liegt dabei stets in der Verwechslung Feldeffekttransistor-Bipolartransistor, da beide Arten in großer Typenvielfalt und leider einander meist sehr ähnlichen bis völlig gleichen Gehäusebauformen, aber mit unterschiedlichsten Daten, vorkommen. Die folgenden Abschnitte geben Hinweise zum gezielten Ausprüfen von Bipolartransistoren, Feldeffekttransistoren, Thyristoren und Zweipolen (Dioden aller Art). Entsprechend dem Gesagten sollte man daher bei jedem Objekt, das nicht mit Sicherheit *kein* Transistor ist, die in Abschnitt 3.2. und Abschnitt 3.3. gegebenen Hinweise gleichermaßen beachten, bis genau feststeht, welcher der beiden „Familien" das Objekt zuzuordnen ist. Da verschiedene Test- und Prüfbefunde in mehrfacher Hinsicht aussagekräftig sind, lassen sich gewisse Überschneidungen und „Querverbindungen" in den folgenden Hinweisen, die als Denkhilfen für die eigene Kombinationsarbeit gedacht sind, nicht vermeiden. Außerdem ist es nicht möglich, alle denkbaren Kombinationen übersichtlich aufzugliedern. Prinzipiell geht man jedoch bei den ersten praktischen Tests immer davon aus, vorhandene „Durchgänge" zu finden und nach den Arten „Diodenstrecke", „Ohmscher Widerstand" und „Kontakt (0 Ω)" zu analysieren. Es ist günstig, die so gefundenen „Einzelstrecken" dann zunächst auf dem Papier theoretisch zu einem sinnvollen, bekannten Halbleitertyp „zusammenzusetzen", dessen „Schaltbild" allen bisherigen Testergebnissen entspricht und keine Widersprüche offenläßt. Die so gefundene vorläufige Skizze wird mit weiteren Tests und Messungen ergänzt bzw. korrigiert. Nicht berücksichtigt wurden bei den

folgenden Darlegungen integrierte Schaltkreise ([1], [4]) und optoelektronische Bauelemente ([9], [18]), wobei daran erinnert sei, daß es auch hochkomplexe Schaltkreise mit nur 3 ... 4 Anschlüssen (Spannungsstabilisatoren, OPV u. ä.) und optoelektronische Bauelemente ohne „Optik-Fenster" (z. B. Optokoppler) gibt. Bauelemente mit mehr als 4 Anschlüssen können aber auch sehr einfach sein. Der *BFY 91* z. B. enthält im normalen *TO 7*-Transistorgehäuse 6 Anschlüsse, 2 ganz normale, voneinander getrennte npn-Silizium-Planartransistoren! Dies sind die Grenzfälle, in denen auch die ausführlichsten Hinweise und Prüfempfehlungen nichts helfen!

3.2. Bipolartransistoren (npn, pnp, Silizium, Germanium)

Die Anschlußermittlung von Bipolartransistoren erleichtert die einfache Durchgangsprüfeinrichtung in Bild 3.1. Man benutzt als Prüfspannung 1,5 V (Monozelle o. ä.). Der strombegrenzende Vorwiderstand wird so bemessen, daß für Bipolartransistoren kleiner Leistung, maximal 1 mA, zum Ausprüfen von Leistungstransistoren 10 mA bzw. bei Feldeffekttransistoren 0,1 mA fließen. Vielfachmesser mit Widerstandsbereich oder entsprechende Ohmmeter, die die gleiche Prüfspannung und etwa gleichen aus den R_x-Klemmen fließenden Strom aufweisen, lassen sich ebenfalls verwenden. Diese bei Bedarf schnell improvisierbare Schaltung eignet sich, um an unbekannten Halbleitern bereits viele Erkenntnisse zu gewinnen. Beim direkten Verbinden zeigt Instrument I genau Vollausschlag. Liegt zwischen den Prüfspitzen, mit denen jeweils 2

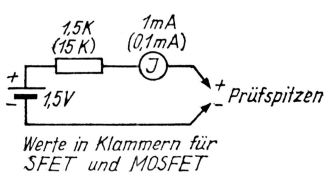


Bild 3.1
Einfache Prüfschaltung zur Anschlußermittlung bei unbekannten Halbleitern

Pole des unbekannten Objekts angetastet werden, ein *Ohmscher* Widerstand, so ist der I-Ausschlag entsprechend geringer und *in beiden Polungen* (Prüfspitzen vertauschen) *gleichgroß*. Liegt zwischen den Prüfspitzen ein Diodenübergang (pn-Übergang), so ist nur in einer Polung (mit Anode an Prüfanschluß +) Stromfluß festzustellen. Ist umgekehrt gepolt, so erkennt man entweder keinen Stromfluß oder allenfalls einen sehr geringen Strom. Dabei kann es sich um Rest- oder Sperrströme (Kollektorreststrom bei Germaniumhalbleitern) oder auch um parasitäre Nebenströme in FET-Strukturen handeln. Zunächst interessiert die Polung, die den größeren I-Ausschlag (angetastete Diodenstrecke in Durchlaßrichtung) ergibt. Hierbei reduziert sich die Batteriespannung um den Wert der für das Halbleitermaterial typischen Schwellenspannung, die bei Strömen um 0,1 ... 1 mA für Germanium bei 0,15 ... 0,4 V, für Silizium bei 0,7 ... 0,9 V liegt. Schlägt Instrument I um mehr als 50% aus, so kann man daher mit einiger Sicherheit auf Germaniumhalbleiter, bei Instrumentenausschlägen um 30 ... 50% dagegen auf Silizium schließen. Damit ist bereits eine sehr wichtige Feststellung getroffen. Soweit es sich um Germanium-Zweipole (Dioden) handelt, scheiden Z-Dioden, Kapazitätsdioden und ähnliche Sonderformen bereits aus, denn sie werden nur aus Silizium gefertigt. Es dürfte sich dann um eine normale Germanium-Kleindiode oder einen Germanium-Gleichrichter handeln, deren Leistungsklasse usw. sich wie bereits genannt abschätzen läßt. Bei Transistoren kann man (wenn Germanium vorliegt) bereits Feldeffekttransistoren ausschließen, diese werden ebenfalls nur als Silizium-Typen gefertigt.

Zeigt das Instrument mehr als 90% Ausschlag an, liegt meist ein Ohmscher Widerstand (in speziellen Halbleitern — z. B. MAA-Typen von Tesla integriert) oder, wenn sich hierbei je nach Polung auch nur geringste Unterschiede im Ausschlag zeigen, eine sehr niederohmige Halbleiterschicht vor. Dies kann z. B. eine beschädigte Sperrschicht sein (defekter Prüfling!), aber u. U. auch der Kanalwiderstand eines Feldeffekttransistors (meist vom Verarmungstyp, u. U. auch die Source-Bulk-Diodenstrecke eines FET). Bei Zweipolen (Diodenbauformen)

ist außer einem defekten Prüfling auch eine spezielle Backwarddiode oder Schottkydiode (sie zeichnen sich durch sehr geringe Schwellenspannungen aus) möglich. Diese Spezialdioden wendet man meist für sehr hohe Frequenzen an, worauf ihre Gehäusebauform oft schon schließen läßt.

Beim Ausprüfen der Anschlußlage unbekannter Transistoren geht man davon aus, daß sowohl die Basis-Emitterstrecke als auch die Basis-Kollektorstrecke als je eine Diode aufgefaßt werden können. Bild 3.2 zeigt diese „innere Ersatzschaltung" für pnp-Typen, Bild 3.3 für npn-Typen. Hat der Transistor nur 2 Anschlüsse, so ist das Metallgehäuse der 3. Anschluß. Sind 3 Anschlüsse vorhanden, so prüft man zunächst jeden einzeln gegen das Gehäuse in beiden Polungen. Selbstverständlich ist mit geeigneter Skizze nach jeder Prüfung zu notieren, was zwischen welchen Anschlüssen gemessen wurde! Weist einer der Anschlüsse gegen Gehäuse direkten Durchgang (Vollausschlag bei I in Bild 3.1) in beiden Polungen (!) auf, so hat dies für den späteren Einsatz des Transistors u. U. Bedeutung (Abschirmwirkung des Gehäuses). Für die folgenden Prüfungen bleibt diese Tatsache jedoch zunächst unbeachtet. Hat der Prüfling 4 Anschlüsse, so wird zunächst ermittelt, welcher direkten Kontakt (0 Ω in beiden Polungen) zum Gehäuse liefert. Dieser Anschluß ist dann, wenn er bei weiterer Prüfung gegen die übrigen 3 Anschlüsse in jeder Polung keinerlei Durch-

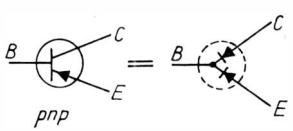


Bild 3.2
Ein pnp-Transistor kann als Kombination zweier Diodenstrecken aufgefaßt werden (zur Ermittlung der Anschlußlage); bei pnp sind die „Katoden" gemeinsam

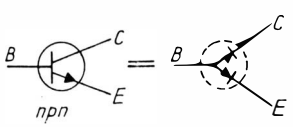


Bild 3.3
Ein npn-Transistor kann als Kombination zweier Diodenstrecken mit gemeinsamer Anode aufgefaßt werden

gang aufweist, der Gehäusekontakt. Das Gehäuse ist somit für Abschirmzwecke gedacht und der Transistor wahrscheinlich ein HF-Typ. Dieser Anschluß bleibt bei den folgenden Prüfungen unbeachtet. Weist keiner der vorhandenen 4 Anschlüsse Kontakt zum Metallgehäuse auf, so handelt es sich wahrscheinlich nicht um einen einfachen Bipolartransistor! Es kann dann u. U. ein Feldeffekttransistor mit doppeltem Gate oder getrennt herausgeführtem Substrat (Abschnitt 3.3.) vorliegen.

Bei Transistoren mit 3 Anschlüssen, von denen einer Kontakt mit dem Gehäuse hat, ist dies meist entweder die Basis oder der Kollektor, in beiden Fällen ist ein HF-Typ anzunehmen. Zunächst wird jetzt jeder der verbleibenden 3 Anschlüsse gegen jeden in beiden Polungen geprüft. Man wird (wenn ein Bipolartransistor vorliegt) 2 Anschlüsse finden, die zueinander in *beiden* Polungen *keinen* Durchgang, bzw. bei Germaniumtypen allenfalls einen sehr geringen Instrumentausschlag zeigen. Wie Bild 3.2 und Bild 3.3 erkennen lassen, hat man vermutlich Emitter und Kollektor gefunden, zwischen diesen beiden tritt die Antiserienschaltung zweier Diodenstrecken auf, von denen stets eine sperrt. Der verbleibende 3. Anschluß ist also sehr wahrscheinlich die Basis, die hiermit bestimmt wäre. Man prüft nunmehr von diesem Basisanschluß aus gegen die anderen beiden Anschlüsse in beiden Polungen. Ergibt sich jetzt von Basis zu jedem der beiden anderen Anschlüsse mit gleicher Polung Durchgang, mit (auf Basis bezogen) umgekehrter Polung Sperrwirkung, so ist das „Ersatzschaltbild" nach Bild 3.2 oder Bild 3.3 bestätigt. Findet der Amateur mit Pluspol an Basis B Durchgang zu C und E, so handelt es sich um einen npn-Typ (Bild 3.3), mit Minuspol an Basis demzufolge um einen pnp-Typ. In Durchlaßrichtung gepolt (wobei diejenige Diodenstrecke zur Beurteilung herangezogen wird, die den größeren Instrumentausschlag ergibt), ist gleichzeitig am Instrumentausschlag (über oder unter 50%) zu erkennen, ob ein Germanium- oder Siliziumtyp vorliegt. Damit sind die wichtigsten Hinweise gegeben. Eine sichere Unterscheidung von Emitter und Kollektor ist hier noch *nicht* möglich. Sie erfolgt erst bei der sich jetzt anschließenden Datenmessung

des Prüflings mit einem Transistorprüfgerät z. B. nach Abschnitt 4.1. Man vertauscht dabei probeweise Kollektor und Emitter und mißt jeweils den Stromverstärkungsfaktor. Er ist bei Falschpolung erheblich niedriger. Mit der β-Messung werden somit abschließend auch Kollektor und Emitter bestimmt. Handelt es sich um Leistungstransistoren, ist praktisch fast immer der Kollektor mit dem Gehäuse verbunden, wenn dieses überhaupt Verbindung zu den Anschlüssen hat. Wurden auch Kollektor und Emitter einwandfrei bestimmt, verschafft Bild 3.4 noch Klarheit über den eventuell vorhandenen 4. Anschluß. Hat er keine Verbindung zu C, B, E, so dürfte Bild 3.4a anzunehmen sein (HF-Typ). Gehäuseanschluß M gehört dann gewöhnlich an Masse der späteren HF-Schaltung. Oft anzutreffen ist auch die innere Verbindung Kollektor-Gehäuse (Bild 3.4b), die nicht unbedingt auf HF-Typen hindeutet, sondern auch bei Transistoren höherer Verlustleistung (ab 150 mW) einfach dadurch zustande kommt, daß der Transistorkristall zur besseren Wärmeableitung direkt auf dem Gehäuseboden aufgelötet ist. Typisch für HF-Transistoren ist dagegen die Schaltungsweise nach Bild 3.4c, insbesondere für ältere HF-Typen und solche, die zur Verwendung in Basisschaltung für HF-Verstärker bestimmt sind (häufig u. a. bei UdSSR-Fabrikaten).

An die genannte Anschlußermittlung schließt sich die Datenmessung nach Abschnitt 4.1., Abschnitt 4.2., Abschnitt 4.7. oder ähnlichen Verfahren an.

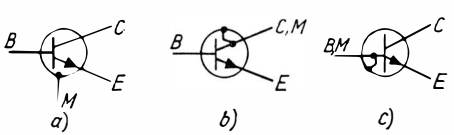


Bild 3.4 Anschlußpunkt eines bei Transistoren vorhandenes Metallgehäuses. a — getrennt herausgeführt; b — intern mit Kollektor verbunden; c — mit Basis verbunden. Ausführung c ist vorzugsweise bei HF-Transistoren gebräuchlich

3.3. Feldeffekttransistoren

3.3.1. Ermittlung der Anschlußlage

Hierfür wird ebenfalls eine Prüfschaltung nach Bild 3.1 benutzt. Der Prüfstrom sollte jedoch maximal 0,1 mA, je nach vorhandenem Instrument auch nur 50 μA, betragen. Die Prüfspannung liegt bei 1,5 ... 2 V, und der Vorwiderstand ist so gewählt, daß das Instrument bei direktem Verbinden der Prüfanschlüsse Vollausschlag zeigt.

Die Ermittlung von FET-Art und Anschlußlage ist leider nicht ganz so einfach und eindeutig möglich wie bei Bipolartransistoren. Da außerdem die Gefahr der Gatebeschädigung bei offenem Gateanschluß besteht, sollte man, wenn nicht sicher auszuschließen ist, daß der Prüfling ein MOSFET sein könnte, zunächst einen Stecksockel geeigneter Art verwenden (übliche Transistorsteckfassungen eignen sich fast immer). Der Stecksockel wird nach Bild 3.5 beschaltet und ist zusammen mit dem eingesetzten Prüfling (dessen eventuellen Gatekurzschluß man erst danach entfernt) als Ganzes zu handhaben. Im folgenden sind also die Anschlußpunkte 1 ... 4 des beschalteten Stecksockels zu prüfen, wobei die hochohmige RC-Beschaltung auf die ersten Tests keinen störenden Einfluß

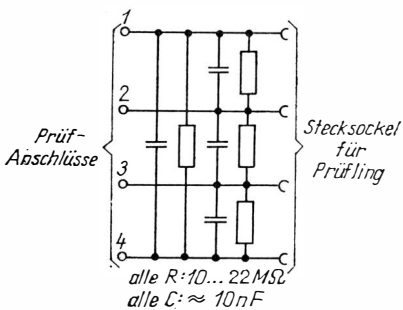


Bild 3.5 MOSFET sollten zum Schutz des Gates während der Anschlußlageermittlung an allen Anschlüssen mit R und C beschaltet sein. Geprüft wird an Punkt 1 ... 4

hat, aber Gatebeschädigung mit einiger Sicherheit verhütet. Um die Anschlüsse ermitteln zu können, muß man sich über den Innenaufbau eines FET klar sein. Er ist deshalb zusammen mit den für die Prüfung interessierenden Ersatzschaltbildern in Bild 3.6 für MOSFET und in Bild 3.7 für Sperrschicht-FET dargestellt. Für p-Kanal-Typen hat man sich in den Ersatzschaltbildern sämtliche Dioden umgepolt vorzustellen. Sinngemäß ändern sich die Aussagen für die Prüfergebnisse im folgenden. Der FET hat 3 oder 4 Anschlüsse. Bei 4 Anschlüssen kann es sich entweder um einen Doppelgate-FET handeln oder um einen normalen FET mit getrennt herausgeführtem Substratanschluß (Bulk B). Häufig ist der Bulk intern mit Source S verbunden (punktierte Verbindung in den Bildern). Hat einer der Anschlüsse direkten Kontakt zum vorhandenen

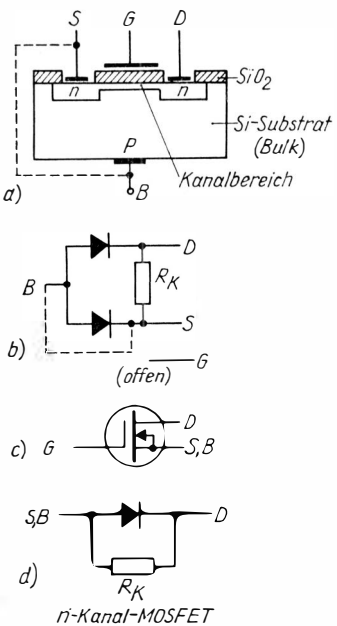


Bild 3.6
Anschlußermittlung bei MOSFET. a — Systemaufbau; b — scheinbare Innenschaltung; c — Schaltsymbol; d — Ersatzschaltung

Metallgehäuse, ist dies, sofern es sich nicht um Gehäusekontaktierung ohne jeden Durchgang zu den übrigen Anschlüssen handelt, fast immer der Bulk- oder Surceanschluß, jedoch niemals ein Gate.

Man prüft zunächst wieder jeden Anschluß gegen jeden auf Diodencharakteristik. Hat der FET nur 3 Anschlüsse, so findet man mindestens 2 Pole, die zueinander die typische Silizium-Dioden-Charakteristik (ähnlich wie beim Silizium-Bipolartransistor genannt) aufweisen. Stellt man weiter fest, daß der 3. Anschluß zu keinem der beiden genannten und in keiner Polung Durchgang hat, so dürfte ein MOSFET vorliegen. Dazu läßt sich das Ersatzschaltbild nach Bild 3.6b und Bild 3.6c verwenden (B, S sind im Beispiel gemeinsam herausgeführt und 1 Anschluß!). Man hat so mit großer Wahrscheinlichkeit Drain und Source gefunden. Vereinfachend sei zunächst angenommen, daß es sich um einen Anreicherungstyp handelt. Der mit R_k dargestellte Kanalwiderstand ist dann bei fehlender Gatespannung $\approx \infty$. Es ergibt sich das vereinfachte Ersatzschaltbild nach Bild 3.6d. Findet man zwischen den als Drain und Source D, S vermuteten Polen in beiden Polungen einen nur gering unterschiedlichen Durchgang, so kann es sich um einen Verarmungstyp ($R_k \ll \infty$) handeln. Der parallel zur Drain-Bulk-Diodenstrecke liegende R_k hat dann bei Gatespannung Null und $U_{DS} < 0{,}5$ V ohmschen Charakter. Im Zweifelsfall läßt er sich nachweisen, indem die Meßspannung (Bild 3.1) unter 0,5 V verringert wird. (Spannungsteiler 100 Ω/1 kΩ parallel zur Batterie, Meßspannung an 100 Ω abgreifen, Instrumentvorwiderstand auf den 0,1fachen Wert verringern bzw. wieder auf Instrumentvollausschlag bei Prüfspitzenkurzschluß festlegen). Bei dieser geringen Spannung sperrt die im FET vorhandene Diodenstrecke (deren für Silizium typische Schwellenspannung bei mindestens 0,6 V liegt) auch in Durchlaßrichtung. Eventuell ist danach kein Stromfluß mehr nachweisbar. Wenn R_k tatsächlich als ohmscher Kanalwiderstand (Größenordnung bei 200 Ω ... 10 kΩ je nach Typ) vorhanden ist, bleibt noch ein entsprechender Stromfluß (einige 10 μA), und es handelt sich meist um einen Verarmungs-FET. (Beispiel: DDR-Typen *SM 103*, *SM 104*). Bei der normalen Prüf-

spannung von 1,5 V ist die Drain-Substratdiode (Bild 3.6) in Durchlaßrichtung gepolt, wenn sich der höhere Instrumentausschlag ergibt. Der Unterschied in beiden Polungen kann, wenn R_k klein bzw. I_{DSS} des Prüflings groß ist, sehr gering sein! Da eine Durchlaßpolung dieser Diodenstrecke bei normalem Einsatz der falsch gepolten Drainspannung entspricht, ist damit zugleich die richtige (nämlich umgekehrte) Betriebsspannungspolung bestimmt. Es bleiben nunmehr, da noch nicht zwischen Drain und Source unterschieden werden kann, 2 Möglichkeiten: Der Prüfling ist entweder ein n-Kanal- oder ein p-Kanal-Typ. Bei einem MOSFET mit interner S-B-Verbindung (also 3 Anschlüssen) unterscheidet man dies wie folgt. Hierzu sei vergleichsweise auch auf die Prinzipschaltungen in [12] verwiesen: Wurde mit geringer Spannung (unterhalb 0,5 V) $R_k < \infty$ nachgewiesen, so liegt ein Verarmungstyp vor. Bei diesen erreicht man eine Drainstromverringerung, wenn es sich entweder um einen n-Kanal-Verarmungstyp mit negativer Gatevorspannung oder um einen p-Kanal-Verarmungstyp mit positiver Gatevorspannung handelt. Dadurch wird R_k in Bild 3.6 größer, wobei die an D-S angelegte Prüfspannung jetzt zu polen ist, daß die „gefundene" Diodenstrecke sperrt, was der richtigen Betriebsspannungspolung entspricht. Man benutzt eine zweite Hilfsspannungsquelle (ebenfalls 1,5-V-Monozelle, vorsorglich mit Widerstand $\approx 50 \ldots 100$ kΩ in Serie!). Sie wird zwischen den „übriggebliebenen" dritten Anschluß, der zu keinem anderen Durchgang zeigte und somit vermutlich das Gate ist, und einmal D, danach S gelegt. Die zweite Hilfsspannung polt man so, daß zunächst Minuspol am Gate liegt. Geht der Strom zurück, so liegt ein n-Kanal-Verarmungstyp vor (die Stromänderung kann u. U. gering sein). Sinkt der im D-S-Kreis gemessene Strom (Bild 3.1) mit positiver Hilfsspannung am Gate, so liegt ein p-Kanal-Verarmungstyp vor. Da ein MOSFET wegen seines symmetrischen Aufbaus (Bild 3.6a) auch mit vertauschtem Bezugspunkt für die Gatespannung arbeitet, läßt sich hieraus noch nicht unmittelbar ableiten, welcher der beiden Kanalanschlüsse der Drain bzw. die Source ist. Dies ergibt sich zusammen mit der vorher ermittelten „richtigen" Polung

der Betriebsspannung; entsprechend Sperrpolung der Drain-Bulk-Diode: beim n-Kanal-Typ liegt Plus am Drain, beim p-Kanal-Typ liegt der Minuspol der Meßschaltung von Bild 3.1 am Drain. Damit sind alle Anschlüsse bestimmt, und es kann eine Datenmessung nach Abschnitt 4.5 oder Abschnitt 4.6 erfolgen.

Etwas unübersichtlicher wird die Ermittlung bei getrennt herausgeführtem Bulkanschluß (Bild 3.6b). Man ermittelt den Bulk ähnlich wie bei Bipolartransistoren für die Basis beschrieben, entsprechend Bild 3.6 als denjenigen Anschluß, der gegen 2 andere Diodencharakteristik aufweist. Zuvor wurde selbstverständlich das Gate, ein Anschluß, der gegen keinen anderen Durchgang zeigt, ermittelt. Zwischen Drain und Source kann dabei zunächst nicht unterschieden werden, man legt den Bulk probeweise mit D oder S zusammen und prüft das Ganze wie vorstehend beschrieben weiter. Die Polung der beiden Bulk-Dioden ergab sich bereits zuvor, womit hier ohne R_k-Ermittlung schon feststeht, ob es sich um einen p-Kanal- oder n-Kanal-Typ handelt! Bei der späteren Datenmessung wird der Bulkanschluß probeweise einmal D, einmal S zugeordnet und in beiden Fällen die Steilheit ermittelt. Diejenige Zusammenlegung, die die höhere Steilheit ergibt, kennzeichnet die Verbindung des Bulks mit dem „richtigen" vom Hersteller dafür vorgesehenen Sourceanschluß.

Läßt sich zwischen D und S kein meßbarer R_k-Wert finden (sinngemäß nach Bild 3.6b oder Bild 3.6d), so handelt es sich um einen Anreicherungstyp. Die (zweite) Gate-Hilfsspannung sollte dann etwa 6 ... 8 V sein. Bei Anreicherungstypen haben Gate und Drain stets die gleiche Polarität. Der Stromeinsatz ist im D-S-Prüfstromkreis bei p-Kanal-Anreicherungstyp mit Minuspol am Gate, bei n-Kanal-Anreicherungstyp mit Pluspol am Gate. Den zweiten Pol legt man jeweils wieder probeweise an S oder D, was zunächst keine Unterscheidung aussagt.

Handelt es sich um einen Sperrschicht-FET (SFET), so gelten die Verhältnisse nach Bild 3.7. Das Gate bildet hier mit dem Kanalbereich eine (normalerweise in Sperrichtung zu polende) Diodenstrecke, die man sich als „verteilte" Diode über dem ganzen Kanalbereich, vereinfachend als 2 Dioden gegen Drain

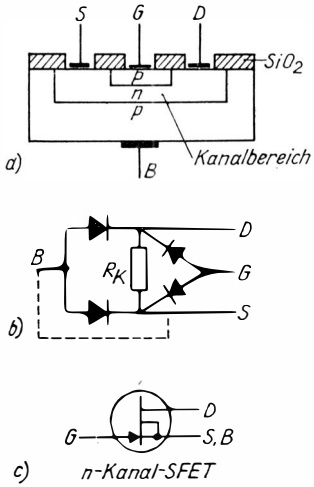


Bild 3.7
Anschlußermittlung bei Sperrschicht-FET. a — Systemaufbau; b — scheinbare Innenschaltung; d — Bulk und Source können intern verbunden sein. Dadurch tritt die obere Drain-Bulk-Diode scheinbar parallel zum Kanalwiderstand R_k auf. R_k ist symbolisch zu verstehen

und Source vorstellen kann (Bild 3.7b). Man findet also keinen „nach allen Seiten durchgangslosen" Anschluß vor. Da SFET stets Verarmungstypen sind, ist immer der Kanalwiderstand R_k (mit Stromfluß in beiden Polungen auch noch unterhalb 0,5 V Prüfspannung) feststellbar. Die Anschlüsse, zwischen denen er auftritt, sind D und S. Für die Bestimmung der Diodenpolung lassen sich D, S vorübergehend verbinden und damit jeweils die beiden Gate- und Bulk-Diodenstrecken parallelschalten. Prüfung auf Sperrpolung (Achtung — Gatedioden nicht höher als mit kurzzeitig 0,1 mA belasten!) gibt Aufschluß darüber, ob ein n-Kanal-SFET oder ein p-Kanal-SFET vorliegt. Damit ist zugleich die richtige Betriebsspannungspolung bekannt. n-Kanal-Typen benötigen eine positive Drainspannung (Gatespannung negativ), p-Kanal-Typen demzufolge negative Drain- und positive Gatespannung. Hat das Bauelement nur 3 Anschlüsse (S-B intern verbunden, Bild 3.7b), so sind damit alle Anschlüsse bereits bestimmt. Bei 4 vorhandenen Anschlüssen ist, wenn einer davon Verbindung zum Gehäuse hat, dies der Bulk B. Sonst sollte man

bei der späteren Datenmessung so vorgehen, daß man vorerst Bulk-Gate verbindet, gemeinsam als Gate betreibt und zunächst D und S willkürlich polt. Die Steilheitsmessung, ersatzweise U_P-Messung, wird mit vertauschtem D-S-Anschluß wiederholt. Die richtige Zuordnung D, S zu den entsprechenden Prüfgeräteanschlüssen ist die, für die sich die höhere Steilheit (bzw. geringerer U_P-Wert) ergibt. Damit ist S bestimmt. Man verbindet nun B mit S und benutzt G als Gate (Steilheit oder U_P messen, notieren), danach wird probeweise G an S gelegt und B als Gate benutzt. Der Anschluß, der die höhere Steilheit bzw. kleinste U_P zeigt, ist endgültig das Gate. Im übrigen ist die Unterscheidung G, B bei vielen Typen schon dadurch möglich, daß die Gate-Diodenstrecke bei der Durchgangsprüfung einen deutlich höheren Spannungsabfall (geringeren Instrumentausschlag) als die Bulk-Diodenstrecke aufweist. Wieweit dieser Effekt ausgeprägt ist, hängt von Typ und innerer Struktur des SFET ab. Grundsätzlich kommt man immer durch sinnrichtige Anwendung der in Bild 3.6 und Bild 3.7 gezeigten Ersatzschaltbilder zum Ziel. Zusätzliche Hilfen, insbesondere zur Unterscheidung von Gate- und Bulk-Anschlüssen, geben die in [12] enthaltenen speziellen Kennlinienfelder. Sämtliche genannten Prüfungen (einschließlich der ersten Datenermittlung auf dem Transistorprüfgerät, bis alle Anschlüsse zweifelsfrei richtig bestimmt sind!) erfolgen sicherheitshalber mit der in Bild 3.5 gezeigten Schutzbeschaltung. Auf sie wird erst bei der abschließenden endgültigen Exemplardatenmessung verzichtet, um dabei die Gate-Eingangsdaten nicht zu verfälschen.

Falls unklar ist, ob es sich bei dem Prüfling überhaupt um einen FET oder vielleicht um einen Bipolartransistor (Bild 3.2 bis Bild 3.4) handelt, hilft folgende Überlegung weiter: Findet sich mindestens ein Anschluß, der zu keinem anderen (und auch nicht zum Gehäuse) Diodendurchgang zeigt, so kann das, wenn kein defekter Prüfling vorliegt, nur das Gate eines MOSFET sein (Bild 3.6). Gibt es Diodendurchgänge zu allen Anschlüssen, die ihrer Lage nach sowohl zu Bild 3.2 bis Bild 3.4 als auch Bild 3.7 „passen", so könnte es sein ein SFET. Dieser muß aber zwischen 2 Anschlüssen mit weniger als 0,5 V

Prüfspannung den Kanalwiderstand R_k (Bild 3.7) aufweisen, da es Anreicherungs-SFET nicht gibt. Ist $R_k \ll \infty$ nicht vorhanden, so ist der Prüfling wahrscheinlich ein Bipolartransistor und wird wie ein solcher weiter geprüft. Achtung — hierzu Verwechslungsmöglichkeiten und Hinweise im folgenden Abschnitt beachten!

3.3.2. Mögliche Sonderformen

Die am Ende des vorhergehenden Abschnitts genannte Überlegung sowie die dort empfohlenen Prüfgänge können bei bestimmten FET-Bauarten zu Fehldeutungen führen. Gemeint sind die Doppelgate- (Dualgate-) FET und insbesondere MOSFET mit integrierter Gateschutzdiode. Auf diese sei zunächst eingegangen. Sie wurden in Bild 2.4 und Abschnitt 2.3.2. bereits erwähnt und dort dem SFET gegenübergestellt. Aus DDR-Fertigung erhält der Amateur MOSFET mit Gateschutzdiode nur als p-Kanal-Anreicherungstypen (*SMY 50*, *SMY 51*, *SMY 52*, *U 105 D*), deren typische schaltkreisähnliche DIL-Gehäusebauform Verwechslung mit anderen Typen schon in vielen Fällen ausschließen wird. Ähnliche FET mit Gateschutzdiode in anderen Gehäuseformen sind aber auch aus Importen zugänglich. Ist völlig unklar, um was es sich bei dem Prüfling handelt, wird die Ermittlung problematisch! Die in Abschnitt 3.3.1. genannten Überlegungen bauen nämlich darauf auf, daß MOSFET-Gate in beiden Polungen keinen Durchgang zu allen anderen Anschlüssen haben und daß SFET am stets vorhandenen Drainstrom I_{DSS} (also nachweisbarem R_k in Bild 3.7) erkennbar sind. Durch die bei der Prüfung in Durchlaßrichtung arbeitende Schutzdiode (Bild 2.4b) wird das widerrufen. Die genannten Überlegungen zur Unterscheidung FET-Bipolartransistor können deshalb ebenfalls Irrtümer ergeben. Man sollte stets daran denken, daß im Zweifelsfall ein als SFET ermitteltes Bauelement auch ein MOSFET mit Gateschutzdiode sein kann. Mit $R_k \approx \infty$ führt dies eventuell zu dem beim Ausprüfen irritierenden „Widerspruch" eines scheinbaren Anreicherungs-SFET, den es

nicht gibt. Entgegen der im vorigen Abschnitt abschließend gegebenen Überlegung muß ein Prüfling, der weder ein „allseits isoliertes" Gate noch einen meßbaren R_{ik} aufweist, also nicht unbedingt ein Bipolartransistor sein, sondern es ist auch möglich, daß es sich um ein Anreicherungs-MOSFET mit Gateschutz-Diode handelt! Dieser würde (probeweise als Bipolartransistor betrieben) mindestens durch Zerstörung der Gateschutzdiode unbrauchbar werden. Man sollte, wenn andere Anhaltspunkte fehlen, daher vorsorglich erst alle denkbaren Tests und Messungen im Hinblick auf einen möglichen MOSFET durchführen. Dessen Betriebsspannungspolaritäten sind dann ja immerhin durch die Polung der Gateschutzdiode und den nicht nachweisbaren R_{ik} usw. gegeben. Nur wenn mit in Sperrrichtung gepolter Gatedioden-Betriebsweise keinerlei Drainstromeinsatz erreichbar ist, schließt man die Untersuchung auf das Verhalten als Bipolartransistor an. Bei der MOSFET-Betriebsweise bietet sich, falls eine Gatespannung von 4 ... 5 V überschritten wird, eine Strombegrenzung (Vorwiderstand vor dem vermeintlichen Gate von einigen 100 kΩ) an. Falls die „Gateschutzdiode" nämlich die Basis-Emitter-Diode eines Silizium-Planar-Bipolartransistors ist, kann sie oberhalb etwa 5 V bereits durchbrechen und dabei ohne Strombegrenzung ($\leq$ 0,1 mA) überlastet werden!

Den Aufbau eines Doppelgate-MOSFET zeigt Bild 3.8. Sein Systemaufbau (a) kann als *Serien*schaltung zweier FET mit gemeinsamem Bulk (b) aufgefaßt werden; das Schaltsymbol zeigt c. Bei Doppelgate-FET sind meist S und B intern verbunden, d. h., sie haben ebenfalls nur 4 Anschlüsse. Handelt es sich um MOSFET, so sind demgemäß 2 (Gate-)Anschlüsse, die zueinander und zu allen anderen keinerlei Durchgang haben, vorhanden. Für den Kanal (D; S, B) ergibt sich das gleiche Ersatzschaltbild der Prüfung wie bei Bild 3.6d. Die Prüfung kann also sinngemäß erfolgen. Die Nachweisbarkeit von R_{ik} ergibt den Rückschluß auf Anreicherungs- oder Verarmungstyp. Die Gates werden bei der späteren Steilheitsmessung unterschieden (G 2 hat i. a. geringe Steilheit als G1). Während der vorhergehenden Tests werden zweckmäßig G 1, G 2 verbunden und als ein Gate behandelt. Verwechslungsmöglich-

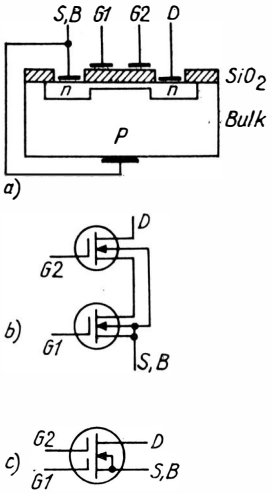


Bild 3.8
Aufbau eines Doppelgate-FET

keiten insbesondere mit einem getrennt herausgeführten Bulkanschluß (auch Verwechslung Einfach-Gate-Typ mit getrenntem Bulkanschluß gegen Doppelgate-FET mit interner S-B-Verbindung) sind vor allem bei SFET gegeben. Ein getrennt herausgeführter Bulkanschluß hat ja ebenfalls eine dem Gate vergleichbare Steuerwirkung (mit geringerer Steilheit) und daher ist bei SFET nicht ohne weiteres zwischen getrennt herausgeführtem Bulk oder eventuell vorhandenem zweitem Gate zu unterscheiden. Konkrete Prüfregeln lassen sich für derartige Sonderfälle nicht geben. Oft bringt erst eine genaue Datenmessung bei allen als möglich vermuteten Anschlußweisen Aufschluß, was jedoch Anhaltswerte oder Vergleichsdaten ähnlicher Typen und deren Verhalten bei abweichenden Betriebsbedingungen voraussetzt. Dem Amateur sind, wie einleitend in Abschnitt 3.1. schon erwähnt, zwangsläufig Grenzen bei der Ermittlung an unbekannten Objekten gesetzt. Doppelgate-FET sind nur aus Importen erhältlich und werden im allgemeinen nur für spezielle Schaltungen (Misch- und Regelstufen in HF-Empfängerbaugruppen u. ä.) verwendet.

Äußerlich sichtbare Unterscheidungsmerkmale solcher Sondertypen zu normalen FET und Bipolartransistoren gibt es außer der Typenbezeichnung nicht. Auch das Fehlen spezieller Verpackungen (Metallfolien, Kurzschlußbrücken an den Anschlüssen u. ä. bei FET übliche Maßnahmen) läßt keine sicheren Rückschlüsse zu.

3.4. Thyristoren und Triac

Die Anschlußbestimmung bei Thyristoren und Triac ist relativ einfach. Soweit es sich um Bauformen ähnlich Leistungsdioden (mit Schraubstutzenanschluß für Kühlkörper) handelt, ist das Gehäuse gewöhnlich die Anode (Thyristoren) bzw. der dem Gate im Schaltsymbol „abgewandte" Hauptanschluß (Triac). Außerdem sind 2 weitere Anschlüsse vorhanden (was diese Bauform sofort sichtbar von Dioden unterscheidet), die fast immer ungleichen Querschnitt oder ungleiche Abmessungen aufweisen. Der kleinere Anschluß ist stets das Gate; die Zündspannung legt man zwischen ihn und den danebenliegenden größeren Katodenanschluß an. Daneben sind für Thyristoren und Triacs mittlerer Leistung ausländischer Fertigung auch Gehäuseformen ähnlich den bekannten Leistungstransistoren (GD-Typen, *OC 26*, *3NU74* u. ä.) bekannt. Für Kleinthyristoren werden entweder Transistorgehäuse mit 3 Anschlußdrähten (ähnlich *TO 7*-Gehäusen) verwendet (Achtung — hier besteht äußerlich Verwechslungsgefahr mit Bipolartransistoren!) oder spezielle Bauformen als Plastgehäuse mit herausgeführter Kühlfahne, die zugleich der Befestigung dient (DDR-Typenreihe *ST 103*). Solche Bauformen weisen außer der Kühlfahne (die entweder Anode oder Katode sein kann) 2 Anschlüsse oder (z. B. *ST 103*) 3 Anschlüsse auf, von denen einer direkten Kontakt mit der Kühlfahne hat. Sie ist daher stets isoliert zu befestigen!

Zum Ausprüfen der Anschlüsse sollte eine Einrichtung nach Bild 3.9 mit 4 ... 4,5 V Prüfspannung und etwa 10 mA Prüfstrom verwendet werden. Der Instrumentvorwiderstand ist günstig, wenn das Gerät beim Verbinden von a-b Vollausschlag

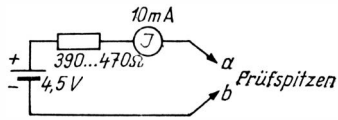


Bild 3.9
Durchgangsprüfschaltung mit günstigsten Werten zur Anschlußermittlung an Thyristoren und Triac

anzeigt. Es kommt zunächst darauf an, den Gateanschluß und seinen zugehörigen Bezugsanschluß (bei Thyristoren die Katode) zu finden. In der bei Transistoren beschriebenen Weise tastet man jeden Anschluß gegen jeden anderen ab, wobei sich die 3 Ergebnisse nach Bild 3.10a, b, c einstellen. Die Gate-Katoden-Strecke zeigt dabei in beiden Richtungen unterschiedlich starken Durchgang, d. h., die von „einfachen" Dioden bekannte ausgeprägte Sperrwirkung fehlt bzw. ist wenig ausgeprägt! Der größte Ausschlag ergibt sich mit Pluspol am Gate (Bild 3.10a). Wegen der recht unterschiedlichen und u. U. über 3 V liegenden Gate-Durchlaßspannung kann dieser größte Instrumentausschlag zwischen 80 ... 20% der Skalenlänge liegen, der Betrag besagt zunächst nichts. Bei falsch gepoltem Gate (Bild 3.10b) ist der Ausschlag merklich geringer. Wird zwischen den Hauptanschlüssen geprüft (Bild 3.10c), läßt sich in beiden Polungen keinerlei Stromfluß nachweisen. Findet man keine 2 Pole, zwischen denen der Strom Null ist, kommt nur ein vermutlich defekter Thyristor bzw. kein Thyristor oder Triac in Frage. Der verhältnismäßig große Stromfluß bei falsch gepoltem Gate (Bild 3.10b) ermöglicht im übrigen ebenso wie der ungewohnt hohe „innere" Spannungsabfall im Bauelement die Unterscheidung gegenüber Bipolartransistoren, deren Basis-Diodenstrecken geringere Schleusenspannung und größeres Durchlaß-Sperr-Verhältnis haben. Das so gefundene Gate verbindet man nunmehr provisorisch mit dem als Anode

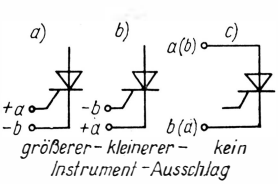


Bild 3.10
Bei den verschiedenen möglichen Anschlußpolungen eines Thyristors an die Prüfschaltung nach Bild 3.9 ergeben sich die dazu angegebenen Instrumentausschläge

angenommenen Hauptanschluß (Bild 3.11a). In einem zweiten Versuch wird das Gate mit der Katode verbunden (Bild 3.12). Ist die Prüfeinrichtung nach Bild 3.9 wieder angeschlossen und trennt man danach (ohne den übrigen Stromkreis zu unterbrechen; auf kontaktsicheres Arbeiten achten!) an der markierten Stelle die Gatezuleitung auf, so bleibt bei einem Thyristor, wenn Gate mit Anode verbunden war und Pluspol a an Anode liegt, der Stromfluß trotz offenem Gate bestehen (Bild 3.11a). Bei der Polung nach Bild 3.11b geht der Strom beim Auftrennen der Gateleitung auf Null zurück. Liegt ein Triac vor, so bleibt der Stromfluß auch bei der Polung nach Bild 3.11b bestehen. Verbindet man Gate mit Katode (Bild 3.12), erfolgt kein Stromeinsatz, unabhängig von der gewählten Prüfspannungspolung. Nach diesen Hinweisen lassen sich bereits alle Anschlüsse und Bauelementtypen (Thyristor oder Triac) bestimmen. Wenn sowohl beim Bild 3.11a wie auch bei Bild 3.11b ein vorhandener Stromfluß bei Auftrennen der Gateleitung immer auf Null zurückgeht, kann das am hohen Zündstrom- oder Haltestrombedarf des Prüflings liegen. Man wiederholt diesen Test dann mit einer Stromstärke von 0,1 ... 0,2 A oder je nach Baugröße, und nur wenn einwand-

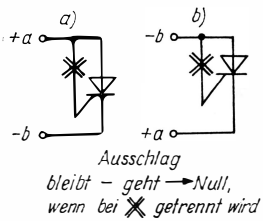


Bild 3.11
Bei zuvor mit Anode verbundenem Thyristorgate bleibt je nach Polung (mit Prüfschaltung nach Bild 3.9) der Stromfluß bestehen oder setzt aus, wenn die Gateleitung aufgetrennt wird, ohne den Stromfluß a—b zu unterbrechen

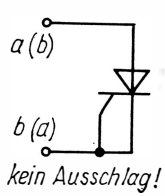


Bild 3.12
Bei mit Katode verbundenem Gate darf in beiden Polungen (Prüfschaltung nach Bild 3.9) kein Strom fließen

frei feststeht, daß es sich tatsächlich um einen Thyristor oder Triac handelt, bis zu 0,5 A Prüfstrom. Sind die Anschlüsse bestimmt, ist es möglich, die Kennwerte nach Abschnitt 4.8.2. und Abschnitt 5.1.2. zu ermitteln.

3.5. Dioden und Gleichrichter

Bauelemente mit nur 2 Anschlüssen (1 Pol eventuell Gehäuse) können je nach Bauform sein:

— bei Kleinbauformen (Miniaturdioden oder solche bis zu normalen Kleintransistor-Gehäusegrößen ohne zusätzliche Befestigungspunkte) entweder Kleindioden (Abschnitt 2.5.1.), Z-Dioden (Abschnitt 2.5.3.), Diac oder Vierschichtdioden (Abschnitt 2.5.4.) sowie Sonderformen wie Kapazitätsdioden, Backwarddioden u. ä. Letztgenannte Bauarten lassen sich vom Amateur ohne größeren Aufwand kaum von normalen Kleindioden unterscheiden, er kann sie aber ggf. als Kleindioden für allgemeine Zwecke ansehen und verwenden;

— bei Leistungsdioden (Schraubbefestigung, entsprechend große Metallgehäuse u. ä. Anhaltspunkte weisen darauf hin) handelt es sich um Gleichrichterdioden oder Diac für größere Ströme. Für Leistungsdioden, die der äußeren Form nach für stärkere Ströme (0,1 A und mehr) ausgelegt sind, benutzt man die Prüfvorrichtung nach Bild 3.1 (jedoch mit 150 Ω für 10 mA ausgelegt), für Kleindioden (oder im Zweifelsfall) die gleiche Anordnung mit den Werten aus Bild 3.1 (für 1 mA). Es muß in Sperrichtung bei Silizium praktisch kein Strom, bei Germanium $\ll$ 1 mA, in Durchlaßrichtung ein deutlicher Stromfluß feststellbar sein. Ebenso wie bei Bipolartransistoren ermittelt man dabei zugleich das Halbleitermaterial (bei Germanium: Instrumentausschlag 50% und mehr, bei Silizium: weniger als 50% Instrumentausschlag). Ist in keiner Polung Durchgang feststellbar, so liegt eventuell eine Vierschichtdiode oder ein Diac vor. Tritt in beiden Richtungen mehr als 50% Skalenausschlag auf und ist der Ausschlag in beiden Richtungen gleichgroß, so ist die Diode unbrauchbar oder gar kein Halbleiter, sondern ein andersartiges Bauelement! Durchgang

$>$ 1 mA in beiden Richtungen, jedoch mit deutlich unterschiedlich großem Instrumentausschlag, ist für den Amateur ein möglicher Sonderfall. Außer um eine defekte Diode könnte es sich dabei um eine Schottky- oder Backwarddiode, u. U. auch um eine Selendiode (höchstens 30 % Skalenausschlag) handeln! Alle genannten Skalenwerte gelten für 1,5 V Prüfspannung!

Zwischen Z-Dioden und normalen Siliziumdioden ist bei dieser Prüfung keine Unterscheidung möglich, denn die Z-Diode verhält sich in Durchlaßpolung wie eine normale Siliziumdiode. Hier gibt erst die Sperrspannungsmessung (Abschnitt 5.1.1.) Aufschluß. Sie ist zur Darstellung der Unterscheidungsmerkmale zunächst im Prinzip gezeigt (Bild 3.13) und läßt sich vom erfahrenen und umsichtig arbeitenden Amateur auch in dieser Form improvisieren. Bei Gleichrichterdioden können die praktisch vorkommenden Sperrspannungen weit über 1 kV liegen, es wird deshalb für solche Dioden (im Zweifelsfall also fast immer) eine entsprechend hohe Prüfspannung U_m (etwa 2 kV) benötigt (Bereitstellung siehe Abschnitt 5.1.). Über Vorwiderstände R_v1 und R_v2, die aus Sicherheitsgründen auf beide Zuleitungen aufgeteilt und mit je 2 W bemessen sind, wird dem Prüfling eine Spannung zugeführt, die mit großer Wahrscheinlichkeit über seiner Sperrspannung liegt. Die Diode ist daher in Sperrichtung überfordert, es kommt zum Spannungsdurchbruch, wobei R_v1, R_v2 den maximal möglichen Strom auf 0,5 mA begrenzen (übrigens ein Wert, der zwar nicht mehr lebensgefährlich ist, aber doch zu erheblichen

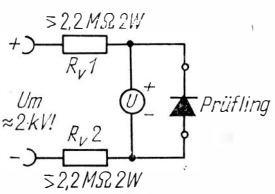


Bild 3.13
Prinzipielle Schaltung zur Ermittlung der Durchbruchspannung an Halbleitersperrschichten. Hinweise in Abschnitt 5.1. beachten! Dieses Verfahren darf nicht für Feldeffekttransistoren benutzt werden!

Schmerz- und Schreckreaktionen führt). Selbstverständlich wird U_m erst nach Herstellen aller Verbindungen eingeschaltet und die Meßanordnung dann nicht mehr berührt! Die in dem so überlasteten Prüfling frei werdende Verlustleistung beträgt im ungünstigsten Fall maximal etwa 0,1 W. Dieser Wert ist auch für Kleindioden mindestens für einige Sekunden stets zulässig, es kommt nicht zu Schäden an der Diode. Parallel zu ihr ist beim Vielfachmesser U (der maximal 50 μA Eigenstromverbrauch und einen Bereich für mindestens 1 kV haben muß; nur bei Bedarf nach niedrigeren Bereichen schalten, *nachdem* der Prüfling angeschlossen ist) ein Wert ablesbar, der der Diodendurchbruchspannung entspricht bzw. nur sehr wenig darüber liegt. Als maximal zulässige Sperrspannung kann man bei Silizium etwa 80% dieser abgelesenen Spannung, bei Germanium etwa 70% dieser Spannung praktisch ausnutzen. Nach diesem Verfahren gemäß Bild 3.13 lassen sich z. B. 1-A-Silizium-Gleichrichter, wie sie allgemein als Netzgleichrichter u. ä. benutzt werden, bei fester Prüfspannung U_m relativ schnell nach Sperrspannungsgruppen klassifizieren. Dies ist für den Amateur bei der Verwendung ungetypter Bastlerware interessant. Für Netzgleichrichterschaltungen (z. B. mit Standardtyp *SY 207*) müssen so geprüfte Dioden sicherheitshalber wenigstens 800 V Sperrspannung anzeigen. Bei Dioden mit hohem Sperrstrom (Germaniumtypen) ergibt die Messung nach Bild 3.13 u. U. etwas geringere als den realen Sperrspannungswert, was dem praktischen Einsatz entgegenkommt. Bei Diodensperrströmen oberhalb 0,1 mA in Nähe der Durchbruchspannung wird die Messung zunehmend ungenau (die Diode erscheint „schlechter", als sie ist).

Interessieren nur Sperrspannungen bis 100 V, werden natürlich U_m und R_v in Bild 3.13 entsprechend niedriger gewählt, um unnötige Gefahrenquellen zu vermeiden.

Nach diesem Prinzip lassen sich auch Kleindioden prüfen. Liegt dabei (bei Silizium-Halbleitern) die Sperr- bzw. Durchbruchspannung unter etwa 30 V, so handelt es sich u. U. um eine Z-Diode. Mit großer Wahrscheinlichkeit ist das der Fall, wenn die Durchbruchspannung unter 20 V liegt! Werden weniger als 5 V gemessen, so kann außer einer Z-Diode entsprechend

geringer Z-Spannung eine Vierschichtdiode oder ein Diac vorliegen. Werte zwischen 20 ... 40 V lassen außerdem noch die Möglichkeit der Kapazitätsdiode (Abstimmdiode) zu. Wird U_m, von Null beginnend, langsam gesteigert (Abschnitt 5.1.) und tritt dabei ab einer bestimmten Spannung ein plötzlicher Rückgang der Anzeige bei U ein, so handelt es sich sehr wahrscheinlich um Diac oder Vierschichtdiode (VD). Die entsprechende Kennlinie als Funktion der an der Diode gemessenen Spannung U_D und Meßspannung U_m kann — mit regelbarer U_m — gemäß Bild 3.14 dargestellt werden. Diac, Vierschichtdioden und auch Triac sowie Thyristoren (diese bei Erreichen der sogenannten Nullkippspannung; praktisch als Sperrspannung bzw. Blockierspannung maximal ausnutzbar sind bei Thyristor und Triac etwa 70% des so gefundenen Wertes) zeigen das Verhalten nach Bild 3.14b mit plötzlichem Rückgang auf die (stets unter 5 V liegende) Durchlaßspannung U_D nach Überschreiten der Kippspannung U_K. Für Diac und Vierschichtdioden kann U_K bei 15 ... 160 V (je nach Typ) liegen, für Thyristoren und Triac bei mindestens etwa 50 V bis nahe 2 kV; vgl. dazu [14] sowie Abschnitt 2.4. und Abschnitt 2.5.4.

Normale Dioden einschließlich Z-Dioden zeigen den Verlauf nach Bild 3.14a wobei der Knick der Kennlinie U_{max} bei Z-Dioden sehr scharf und der folgende Kurventeil fast waagerecht verläuft. Bei Z-Dioden ist $U_{max} = U_z$. Bei anderen

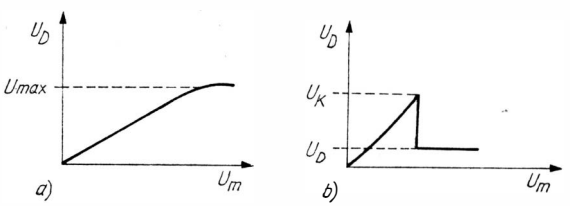


Bild 3.14 Kennlinienverlauf für die Durchbruchspannung am Prüfling (bei langsamer Erhöhung von U_m in Bild 3.13); a = für Dioden, Transistoren, b — Thyristoren, Triac, Diac, VD und Halbleiter mit Kippverhalten

Dioden verläuft dieser Kennlinienknick merklich „abgerundeter", der nachfolgende Kurventeil zeigt ansteigende Tendenz. Mit den in Abschnitt 5.1. beschriebenen Schaltungen ist so ggf. eine Unterscheidung zwischen Z-Diode und Universal-Diode möglich. Für Z-Dioden kommt man demzufolge mit maximal etwa 40 V Prüfspannung für U_m aus, höhere Z-Spannungen als 30 V kommen auch bei Importtypen nicht vor. Ausnahmen sind einige Zweipol-Spannungsstabilisatoren, die ähnlich Z-Dioden verwendet werden, aber eine umfangreiche integrierte Schaltung enthalten, z. B. TESLA *MAA 550.* [4].

3.6. Diac und Vierschichtdioden (VD)

Diese Bauelemente sind, wie im vorangehenden Abschnitt bereits erwähnt, daran erkennbar, daß sie bei Durchgangsprüfung mit 1,5 V (Bild 3.1) bei keiner Polung Stromfluß zeigen. Ergibt eine Prüfung gemäß Bild 3.13 (wobei U_m mit mindestens 300 V zu wählen ist) das bei Bild 3.14b gezeigte Verhalten bzw. bei U in Bild 3.13 eine Spannung unter 4 ... 5 V, eine anschließende nochmalige Durchgangsprüfung nach Bild 3.1, wiederum Sperren in beiden Richtungen, so liegt ein Diac oder eine Vierschichtdiode vor. Denkbar wäre noch eine ZD oder Universal-Silizium-Diode mit Durchbruchspannung unter 5 V. Eine Prüfung nach Bild 3.1, jedoch mit 8 ... 10 V (Vorwiderstand und Instrument für diese Spannung auf 1 mA bemessen), schafft dann Klarheit. Die echte Vierschichtdiode und der Diac zeigen noch keinen Stromfluß. Tritt dieser bei 8 ... 10 V auf, so liegt eine Z-Diode oder mangelhafte Kleindiode vor. Eine genauere Datenermittlung für Vierschichtdioden und Diac ist nach Abschnitt 5.1.2. möglich. Zeigt das so geprüfte und als Diac oder Vierschichtdiode identifizierte Bauelement bei der Messung nach Bild 3.13 (mit $U_m \geq 300$ V) in beiden Polungen Durchbruchspannungen, die um maximal etwa 30% differieren, so ist ein Diac wahrscheinlich. Wird die Differenz beider Durchbruchspannungen bzw. Zündspannungen (U_K-Werte gemäß Bild 3.14b) größer als

50 ... 60%, so handelt es sich sehr wahrscheinlich um eine Vierschichtdiode. Die für ihren Einsatz richtige Polung ist diejenige, für die sich der geringere Spannungswert ergab. Bei Diac ist die Polung beliebig.

4. Prüf- und Meßschaltungen für die Amateurpraxis

4.1. Prüfgerät für bipolare Kleinleistungstransistoren

Bild 4.1 zeigt eine einfache Prüf- und Meßschaltung, die sich für die „Alltagspraxis" des Amateurs sehr gut bewährt hat. Sie ist im Sinne des einleitend (Abschnitt 1.) Gesagten gut geeignet für den Aufbau als Zusatzgerät zum vorhandenen Vielfachmesser, da sie nur wenige relativ billige Kleinteile benötigt. Die 6-V-Batterie schließt man bei Bedarf ebenfalls äußerlich an. Geeignet ist eine Serienschaltung aus 3 Kleinakkumulatoren 2 V 0,5 Ah TGL 3922 (alte Bezeichnung: *RZP 2*) oder 4 Monozellen *R 20* je 1,5 V. Die Batterie und das Meßinstrument I schließt man je nach zu prüfendem Halbleitertyp (pnp oder npn) mit der dafür angegebenen Polung an. Dabei wird zugleich ein Umschalter eingespart. Das Meßinstrument sollte ein Vielfachmesser mit 1-mA-Bereich oder ein Instrument mit maximal etwa 120 Ω Innenwiderstand in diesem Bereich sein. Alle Widerstandswerte und die Batteriespannung sind genau einzuhalten! Für den Anschluß des Prüf-

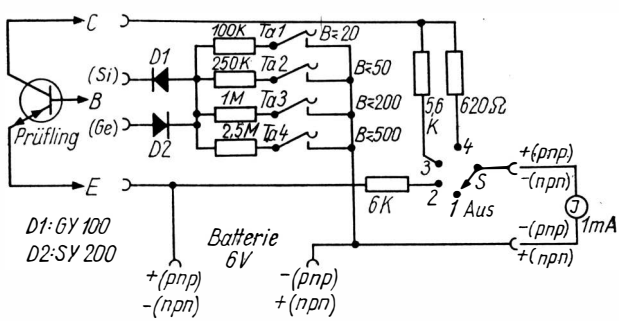


Bild 4.1 Stromlaufplan eines einfachen Bipolartransistorprüfers (als Zusatz zu vorhandenen Meßgeräten geeignet)

lings stehen die Klemmen (günstig: Krokodilklemmen, parallel dazu Transistorstecksockel vorsehen) C, B, E zur Verfügung. Basisanschluß B ist doppelt vorhanden. Man benutzt jeweils den Basisanschluß, der dem zu prüfenden Halbleitertyp entspricht. Die entsprechend im Material unterschiedlichen Dioden D1 (Germaniumtyp 0,1 A) und D2 (Siliziumtyp $\geq$ 0,1 A) sorgen für die Korrektur des Einflusses der unterschiedlichen Basisschwellenspannung bei Germanium- und Silizium-Prüflingen. Die Strombelastung ist erforderlich, um die benötigten, nicht überhöhten Schleusenspannungswerte für die jeweilige Materialart einzuhalten. Kleindioden für D1, D2 ergeben merkliche Meßfehler! Den Prüfling schließt man über D2 bzw. über D1 an. Zunächst wird nunmehr mit Schalter S in Stellung 2 die Batteriespannung kontrolliert, I muß hierbei genau Vollausschlag anzeigen. In Stellung 3 prüft man auf Kollektor-Emitter-Schluß. I darf bei Siliziumtypen nichts, bei Germaniumtypen maximal etwa 70% Ausschlag anzeigen (etwa 0,7 mA oder weniger). Wird mehr angezeigt, so ist der Transistor unbrauchbar. Stellung 4 sollte man dann nicht einschalten. Bei intaktem Prüfling wird in Stellung 4 der Kollektorreststrom I_{ceo} abgelesen. Er soll bei Germaniumtypen der Leistungsklasse bis 0,5 W unter 0,6 ... 0,8 mA liegen, gute Exemplare weisen weniger als 0,2 mA auf (vgl. Abschnitt 2.1.!). Siliziumtransistoren dürfen keinen Reststrom anzeigen (maximal 0,1 μA). Wenn für I ein Vielfachmesser eingesetzt ist, läßt sich dieser kurzzeitig auf den niedrigsten Bereich schalten. Ebenfalls in Stellung 4 des Schalters S wird danach die Stromverstärkung gemessen. Man beginnt mit dem höchsten Bereich (Ta 4) und wählt, falls sich dabei zu geringe Stromzunahme ergibt, nach Bedarf Ta 3 ... Ta 1. Ein Strom von 1 mA bei I entspricht bei gedrückter Taste unmittelbar dem an Ta angeschriebenen Bereichsendwert; niedrigere Ströme rechnet man dementsprechend um. Bei Siliziumtransistoren lassen sich demzufolge die Stromverstärkungsfaktoren β bzw. B unmittelbar ablesen. Bei Germaniumtypen ist in dem bei gedrückter Taste angezeigten Strom jedoch noch der Reststromwert I_{ceo} enthalten und daher vom Anzeigewert abzuziehen. Praktisch geschieht dies sehr einfach dadurch, daß

man sich den Instrumentskalenzeiger bei gedrückter Taste um so viele Skalenteile „zurückversetzt" denkt, wie es den bei offenen Tasten angezeigten Skalenteilen entspricht. Der verbleibende Skalenwert wird unmittelbar als β-Wert abgelesen. Beispiel für einen Germaniumtransistor und 1-mA-Instrument mit 100teiliger Skale: Alle Ta offen = 20 Skalenteile $\triangleq$ 0,2 mA = I_{ceo}. Man schließt nun Ta 4, wobei sich nur sehr geringer Stromanstieg ergibt. Erst mit Ta 2 wird ein deutlicher Stromanstieg auf z. B. 70 Skalenteile erreicht. Hiervon I_{ceo} = 20 Skalenteile abgezogen, verbleiben für β = 50 Skalenteile $\triangleq$ 50% vom Vollausschlag = 50% von Bereichsende Ta 2 (für die B = 50 gilt). Für den Prüfling ist also β=25 und I_{ceo}=0,2mA. Wählt man eine zu niedrige Bereichstaste, wird bei I das Skalenende überschritten. Um bei derartiger Fehlbedienung größere Schäden zu vermeiden, ist in Schalterzuleitungen der 620-Ω-Widerstand vorhanden. Er begrenzt den Instrumentstrom im Extremfall auf 10 mA. Ein 1-mA-Instrument und übliche Vielfachmesser vertragen diesen Strom im entsprechenden Bereich, wenn er nur kurz auftritt, ohne Schaden. Auch der Prüfling wird nicht gefährdet, da er im ungünstigsten Fall mit 10 mA Kollektorstrom oder 20 mW Verlustleistung belastet ist.

Mit diesem Gerät lassen sich alle Germanium- und Siliziumtypen (pnp und npn) der Leistungsklasse bis etwa 0,5 ... 1 W auf Schluß, I_{ceo} und Kleinsignalverstärkung β prüfen.

4.2. Prüfgerät für bipolare Leistungstransistoren > 1 W

Nach dem gleichen Prinzip und mit einer Schaltung gemäß der in Bild 4.1, können auch Leistungstransistoren geprüft werden. Die Prüfschaltung dafür unterscheidet sich nur insoweit von Bild 4.1, als sie für höhere Ströme auszulegen ist. Die Batterie muß entsprechend höheren Strom (bei konstantbleibender Spannung) aufbringen. Als ein für Amateurzwecke günstiger Kompromiß, der keine großen und für ihn schwer improvisierbaren Anforderungen an die Stromversorgung stellt, empfiehlt

sich die Messung bei 0,1 A Kollektorstrom (für Meßbereichsende). Bezüglich des bei anderen Strömen eventuell abweichenden B-Wertes sei auf Abschnitt 2.2. und Bild 2.3 verwiesen. Mit dieser Darstellung ist es möglich, den Meßwert näherungsweise zu korrigieren. Dies ist überflüssig, wenn man in die vorgesehene Schaltung einen Transistor mit etwas höherem B-Wert einsetzt, als er für die Schaltung jeweils nötig ist. Für die Messung von Leistungstransistoren eignet sich deshalb für I ein Instrument mit Meßbereich 0,1 A (ggf. auch 0,25 A, dann erweitern sich demgemäß alle an Ta 1 ... Ta 4 angeschriebenen Bereichsendwerte um den Faktor 2,5) am besten. Sämtliche Widerstände in Bild 4.1 sind auf 1/100 des angegebenen Wertes zu verringern, D1 und D2 bleiben unverändert. Es gelten wieder die an Ta 1 ... Ta 4 angeschriebenen B-Bereiche. Die maximale Belastung des Prüflings bleibt unter 1 W. Die Reststrommessung (Schalterstellung 4) nimmt man zweckmäßig mit entsprechend verringertem Meßbereich des bei I angeschlossenen Vielfachmessers (z. B. Bereich 2,5, 10 oder 25 mA) vor. I_{ceo} kann bei Germanium-Leistungstransistoren je nach Typ und Qualität immerhin bis 10 mA und mehr, bei Siliziumtypen auch noch erheblich über 1 mA betragen. Dabei und für vorgesehene Anwendungsfälle des Prüflings interessiert oft I_{ceR}, deshalb sei auf Bild 2.1b verwiesen. Man kann einen Widerstand R provisorisch parallel zu den B-E-Anschlüssen des Prüflings anklemmen und bei I dann I_{ceR} ablesen, wobei R am besten gemäß dem in der vorgesehenen Anwendungsschaltung real vorhandenen entsprechenden Widerstandswert gewählt wird. Man beachte dazu auch die Hinweise in Abschnitt 2.1. und Abschnitt 2.2. Moderne Silizium-npn-Leistungstransistoren in Planartechnik neigen eventuell ebenfalls bereits bei derartigen Prüfschaltungen zu HF-Selbsterregung, wenn sie über unvermeidlich längere Zuleitungen angeschlossen werden (Abschnitt 6., Bild 2.2 und Bild 5.5)!

4.3. Paarungsprüfer für bipolare Transistoren

Häufig benötigt der Amateur (z. B. für NF-Endstufen) Transistor-„Paare", d. h. 2 möglichst datengleiche Exemplare des

gleichen Typs. *Nicht* gemeint sind die aus je einem npn- und pnp-Typ zusammengesetzten „Komplementärpaare", die der Amateur einzeln ausmessen muß! Bei derartigen Transistorpaaren wird möglichst genaue Übereinstimmung des β- oder B-Wertes bei allen vorkommenden Kollektorströmen gefordert. Die Messung bei nur einem Kollektorstromwert, wie beschrieben, gewährleistet nicht immer ausreichend genau gleichen Verlauf der Kennlinien, die z. B. in Bild 2.3 annähernd deckungsgleich sein müßten. Für den Amateur genügt es statt der Aufnahme vollständiger Kennlinienfelder immer, einen Relativvergleich der Kennlinienabweichungen zueinander durchzuführen, wenn ein Transistorpaar vorhanden ist, das in einem Punkt gleiche Werte zeigt. Dieser Relativvergleich ist nach Bild 4.2 mit wenig Aufwand möglich. Außer Vielfachmessern eignen sich auch ungeeichte oder fehlerhafte Meßwerke im angegebenen Strombereich! Ferner ist eine geeignete Stromquelle mit den in Bild 4.2 angegebenen Werten erforderlich (auch Netzteile geeignet). Für das Prüflingspaar T1, T2

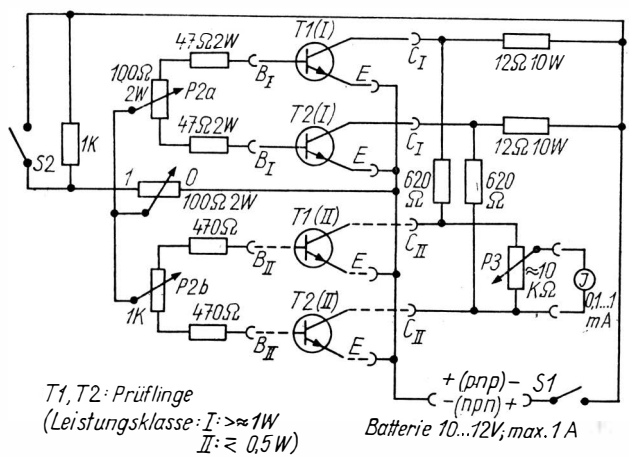


Bild 4.2 Stromlaufplan des Transistor-Paarungstesters. Zwischen S2 und E liegt P1

sind jeweils zweimal 3 Anschlußbuchsen B, E, C vorhanden. Um den Aufwand für Umschalter zu sparen, wurden diese Anschlüsse doppelt vorgesehen. Je nach Leistungsklasse der Prüflinge benutzt man die Anschlüsse I (für Transistoren ≥ 1 W) oder die Anschlüsse II (für Kleinleistungstypen bis 0,5 W). An I werden die Prüflinge mit maximal etwa 3 W belastet, was für die Zeitdauer der sehr zügig durchführbaren Prüfung auch ohne Kühlung zulässig ist; die Prüflingsbelastung an II ist maximal 60 mW. Die Batteriepolung richtet sich wiederum danach, ob pnp- oder npn-Typen geprüft werden. Bei Prüfbeginn ist S2 geschlossen, S1 geöffnet, P1 steht am Anschlag 0. P2a und P2b lassen sich zur Bedienungsvereinfachung auf gemeinsamer Achse koppeln, wobei keine besonderen Gleichlaufforderungen gestellt werden, man kann sie aber auch getrennt anordnen. Sie stehen wie auch P3 zunächst in Mittelstellung. Nach Einsetzen beider Prüflinge wird S1 geschlossen und nun P1 langsam nach 1 gedreht. Über P2a oder P2b erhalten die Prüflinge jetzt Basisstrom, der wenn P2 in Mittelstellung steht, für beide Transistoren gleichgroß ist. Er kann mit P1 zwischen Null und seinem Höchstwert kontinuierlich geregelt werden. Sind die Prüflinge kennliniengleich, so steigen auch beide Kollektorströme übereinstimmend, womit an ihren Kollektorwiderständen gleiche Spannung abfällt und die Differenzspannung zwischen den Kollektor, die über P3 abgegriffen und mit I registriert wird, im Idealfall Null ist. Instrument I ist also nur „Nullspannungsindikator", P3 soll möglichst voll aufgedreht sein und reduziert lediglich die Anzeigeempfindlichkeit bei größeren Abweichungen der Prüflinge voneinander. Er schützt also I gegen ungewollte Überlastung. Haben die Prüflinge große B-Faktoren, wird der gesamte Kollektorstrombereich (bis maximal 1 A bei Leistungsklasse I) bereits mit einem für die Bedienung unangenehm kleinen Drehwinkel von P1 überstrichen. Man kann dann bedarfsweise S2 öffnen und damit den Drehbereich von P1 nach Bedarf vergrößern. Auf diesem Gerät werden also keine Werte für Spannungen oder Ströme abgelesen! Sind die Prüflinge ungleich, zeigt das Instrument I während des Durchdrehens von P1 einen Querstrom an bzw. schlägt nach der

betreffenden Seite aus. Günstig sind für I deshalb Meßwerke mit Mitten-Nullpunkt. Da jedoch nur die genaue Nullanzeige benötigt wird und jeder Instrumentzeiger über diese nach links etwas Spielraum hat, ist Mitten-Nullpunkt nicht erforderlich. Die aufgetretene Unsymmetrie läßt sich durch gegenläufige Basisstromänderung beider Prüflinge kompensieren, was mit P2 (a oder b je nach Prüflingsanschluß) geschieht, bis die Brückenschaltung wieder im Gleichgewicht (I stromlos) ist. Das Maß der Abweichung von der Mittelstellung gibt dann unmittelbar den Betrag und die Richtung der Abweichung der Prüflingsstromverstärkungen voneinander an. Die Mittelstellung wird durch einmaligen Stromstärkevergleich zwischen E- und beiden B-Anschlüssen je Regler markiert. Die Endstellungen von P2 entsprechen einem B-Unterschied von etwa 3:1 ... 1:3, P2a und P2b können von 3:1 ... 1:1 ... 1:3 (oder — 33% ... 0 ... 33%) geeicht werden. Die für übliche Schaltungen geforderte Paarungsbedingung läßt gewöhnlich den maximalen Spielraum von 1:0,8 ... 1,2 zu. P2 darf also für gute Paarung über den ganzen Drehbereich von P1 hinweg nicht allzuweit aus der Mittellage kommen. Praktisch überprüft man, indem P1 mäßig schnell von 0 nach 1 gedreht, dabei das Instrument beobachtet und zugleich versucht wird, mit P2 stets I = 0 zu halten. Die Prüfung läßt sich also recht zügig durchführen, wobei die mit P2 notwendig werdenden Korrekturen sofort zeigen, ob die Paarungsbedingungen den Erfordernissen entsprechen.
Hinweise für eine oszillografische Kennliniendarstellung (die für den Amateur entbehrlich ist) enthalten [6], [7], [8].

4.4. Sättigungsspannungstester für npn-Silizium-transistoren

In Abschnitt 2.1.2. wurde bereits darauf hingewiesen, bei npn-Siliziumtransistoren ist es in der Elektronik oft erforderlich, daß diese bei den zu schaltenden Strömen eine Sättigungsspannung von 0,4 V und weniger haben. Für den Amateur ist diese Unterscheidung insofern wichtig, als z. B. bei der

sehr preiswert erhältlichen ungetypten Bastlerware nicht bekannt ist, ob das vorliegende Exemplar ein Planartransistor mit u. U. störend hoher Sättigungsspannung U_{CEsat} oder ein Epitaxialplanartyp (Schalttransistor) mit niedrigem U_{CEsat} ist. Da für die Praxis die Aussage genügt, ob U_{CEsat} einen bei etwa 0,4 V liegenden Grenzwert über- oder unterschreitet, läßt sich diese Prüfung ohne zu messen auf eine einfache Ja/Nein-Testaussage zurückführen. Bild 4.3 zeigt die Schaltung dieses Testers. Der Prüfling wird bei B, E, C angeschlossen und etwa mit 0,1 A Kollektorstrom und maximal 200 mW belastet; dies ist für sämtliche Silizium-Kleinleistungstypen zulässig. Stromquelle ist eine normale 4,5-V-Taschenlampenbatterie. T2 muß ein pnp-Germaniumtyp sein. Die Solldaten für T2 und T3 sind in Bild 4.3 mit angegeben. D1 kompensiert die U_{BE}-Schwellenspannung von T3 und muß daher ein Siliziumtyp (vorzugsweise 1-A-Typ, *SY 200* u. ä.) sein. Lampe La ist normal erloschen. Sie leuchtet auf, wenn der eingesetzte Prüfling bei den angewendeten (der Praxis angenäherten) Prüfdaten $I_B \approx 10$ mA und $I_C \approx 0{,}1$ A einen Wert von $U_{CEsat} < \approx 0{,}4$ V aufweist. Der Prüfling ist also als Schalter geeignet, wenn La aufleuchtet. Dabei muß außerdem eine praktisch verwertbare Mindeststromverstärkung $B > \approx 15$ des Prüflings garantiert sein. Die Schaltungsfunktion ist einfach: Bezogen auf Emitter T1 ist die Basisspannung des Silizium-Prüflings stets $\approx +0{,}7$ V, dies ist zugleich die Emitter-

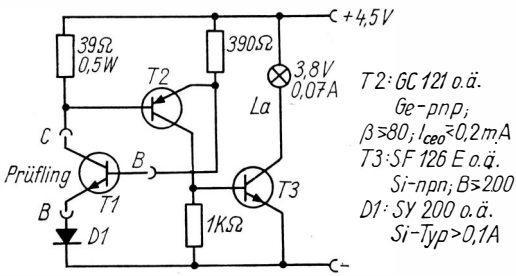


Bild 4.3 Stromlaufplan des Sättigungsspannungstesters für npn-Silizium-Transistoren

spannung von T2. Sobald die Kollektorspannung an T1 (bezogen auf Emitter T1) den Wert von 0,4 V unterschreitet, wird die Basis T2 um $\geq 0{,}3$ V negativ gegen den Emitter T2, womit T2 öffnet. Sein Kollektorstrom steuert T3 an, La leuchtet auf. Wird der Prüfling nicht genügend gesättigt, so ist die Basisspannung für T2 nicht genügend negativ (oder sogar positiv) gegen Emitter T2, so daß T2, T3 gesperrt und La erloschen bleiben.

4.5. FET-Prüfer für Verarmungstypen

Bild 4.4 zeigt eine einfache Prüfschaltung für Verarmungs-FET. Als Prüfling dargestellt ist ein n-Kanal-Verarmungs-MOSFET (DDR-Typen *SM 103, SM 104*). In gleicher Weise können SFET geprüft werden. p-Kanal-Typen beider Arten lassen sich prüfen, wenn man Batteriespannung und Meßwerk umpolt und die Vorzeichen an der Beschriftung von P1 ändert. In Stellung „I_D" von S1 wird der Drainruhestrom I_{DSS} angezeigt, sobald Ta geschlossen ist. Der bei geöffneter Ta eingeschaltete Schutzwiderstand 680 Ω verhindert Instrumentüberlastung bei defektem FET (D-S-Schluß oder D-B-Schluß). Wird bei offener Ta bereits Skalenendausschlag erreicht, besteht Verdacht auf Schluß. Ta darf dann nicht

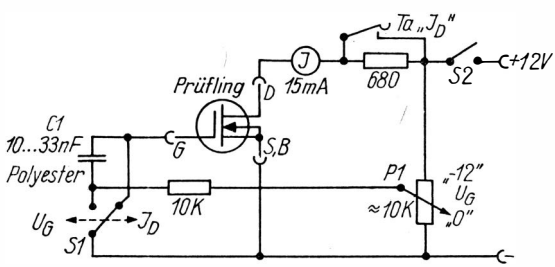


Bild 4.4 Stromlaufplan eines einfachen Prüfgeräts für Verarmungs-MOSFET und SFET. Für p-Kanal-Typen Batterie umpolen

geschlossen werden. Zeigt das Gerät weniger als 15 mA an, ist es möglich, bei geschlossener Ta I_{DSS} abzulesen. Für das Instrument läßt sich vorteilhaft wieder der Vielfachmesser verwenden.

Nunmehr wählt man mit P1 eine Gatespannung U_G vor (P1 wird unmittelbar in Volt geeicht). Sie lädt $C1$, der ein Foliekondensator hochwertigster Isolation sein soll, mit Plus am unteren Ende auf. Danach wird S1 in Stellung „U_G" geschaltet, womit die Ladung von $C1$ mit umgekehrter Polarität am Gate des Prüflings auftritt. An I ist (Ta geschlossen) der zu dieser mit P1 gewählten U_G gehörende Drainstrom I_D ablesbar. Wird P1 verändert, findet man bei ständigem Umschalten von S1 eine Spannung U_G, bei der der Drainstrom zu Null wird. Ist I ein Vielfachmesser, muß man ggf. den Meßbereich verringern und P1 und $I_D \approx 10 \ldots 30\,\mu A$ einstellen. Diese an P1 ablesbare Spannung ist die Abschnürspannung U_P des Prüflings. Auf die gleiche Weise läßt sich die gesamte Kennlinie des FET aufnehmen (vgl. dazu Kennlinien in [13], ggf. auch in [5]). Polt man $C1$ mit S1 um, wirdeine zweite entgegengesetzt gepolte Gatespannungsquelle nicht benötigt.

In Stellung „U_G" liegt $C1$ ohne Gatewiderstand am Gate und wird daher nur über seinen eigenen Leckstrom entladen, zu dem noch die Isolationswiderstände der Prüflingsfassung, von S1 und des Prüflings-Gates selbst kommen. Die Gateisolation soll bei MOSFET mindestens $10^{12}\,\Omega$, bei SFET $10^8\,\Omega$ betragen. $C1$ entlädt sich daher nur sehr langsam. Voraussetzung ist eine erstklassige Isolation der Gatezuleitung bis S1 und $C1$, die man deshalb freitragend und ohne Lötstützpunkte ausführt. $C1$ wird direkt an S1 angelötet.

Zur Gate-Isolationsprüfung stellt man mit P1 einen gerade noch gut ablesbaren Drainstrom (0,5 ... 1 mA) ein. S1 verbleibt in Stellung U_G, und I_D steigt während der Selbstentladung von $C1$ langsam an. Bei einem Gateisolationswiderstand von $10^8\,\Omega$, einem für SFET noch zulässigen, für MOSFET bereits als unnormal niedrig anzusehenden Wert, ergibt sich binnen etwa 10 ... 15 s eine Verdoppelung des Drainstroms. Ein derart schneller I_D-Anstieg wäre für einen SFET gerade noch zulässig, für einen MOSFET schon als Gateisolations-

mangel anzusehen. Gute Exemplare haben einen wesentlich langsameren Drainstromanstieg. Bei durchgeschlagener Gateisolation wird $C1$ sofort entladen, und die Drainstromverringerung mit P1, S1 gelingt überhaupt nicht, bzw. es stellt sich beim Umschalten von S1 stets ein anderer, von der Stellung des P1 unabhängiger und nicht beeinflußbarer I_D-Wert ein. Der FET ist dann unbrauchbar. Eine große Skale ermöglicht genaues Ablesen und erleichtert die Skaleneichung von P1, die am einfachsten realisiert wird, indem man einen hochohmigen Vielfachmesser zwischen Schleifer und unterem Ende von P1 anschließt. Die dabei punktweise aufgenommene Spannung wird an P1 mit umgekehrtem Vorzeichen angeschrieben.

Eine für Amateurzwecke ausreichend genaue Steilheitsermittlung beim jeweils interessierenden I_D-Wert ist möglich, wenn die mit P1 gewählte Gatespannung um genau 1 V geändert und die daraufhin erfolgende Drainstrom*änderung* abgelesen wird. Man erhält so unmittelbar die Steilheit S in mA/V = mS.

Zum schnellen Sortieren und überschlägigen Prüfen der Kennwerte U_P und I_{DSS} eignet sich die mit einem Vielfachmesser leicht improvisierbare Schaltung nach Bild 4.5. Auch sie ist außer für das dargestellte Beispiel des n-Kanal-MOSFET für SFET beider Polaritäten sowie für p-Kanal-Verarmungs-MOSFET geeignet. Der bei U eingeschaltete Vielfachmesser (Eigenstromaufnahme höchstens 50 μA, Meßgeräte mit geringerem Eigenstrombedarf sind von Vorteil!) zeigt bereits un-

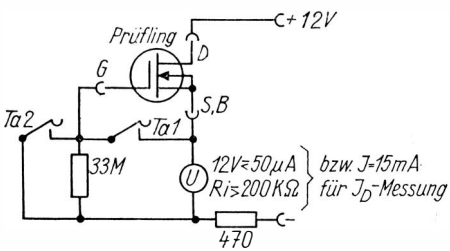


Bild 4.5 Diese Schaltung ermöglicht eine direkte Messung von n-Kanal-Verarmungs-MOSFET und SFET mit Vielfachmesser. Für p-Kanal-Typen Batterie umpolen

mittelbar und mit für die Praxis völlig ausreichender Genauigkeit den Wert U_P an. Den Meßbereich für U sollte man dabei nicht unter 10 V bzw. R_i des Instruments, mindestens 200 kΩ wählen. Wird Ta1 geschlossen und das Instrument auf einen geeigneten Strombereich (10 ... 15 mA oder nach Bedarf) umgeschaltet, so ist an gleicher Stelle unmittelbar I_{DSS} ablesbar. Ist bei einem auf U_P-Messung geschalteten Meßinstrument Ta1 geöffnet und wird Ta2 geschlossen, so darf sich der angezeigte Wert U_P nicht ändern. Reagiert das Voltmeter auf die Betätigung von Ta2 mit Ausschlagänderung von mehr als 10% bei MOSFET, mehr als 20% bei SFET, so handelt es sich um eine mangelhafte Gateisolation des FET. Bei völlig durchgeschlagener Gateisolation ist der Wert für U_P unnormal hoch (praktisch fast die volle Betriebsspannung). Dieser Zustand muß bei U_P-Messung und Schließen von Ta1 angezeigt werden. Reagiert der Prüfling beim Schließen von Ta1 nicht mit U_P-Erhöhung, so besteht Verdacht auf unterbrochene Gatezuleitung. Mit dieser Schaltung sind also alle wesentlichen Kennwerte und Fehlerarten (außer Steilheitsmessung) einfach durchführbar. Die Funktionserläuterung dieses Meßprinzips ist in [13] zu finden, ebenso für die nachfolgenden Schaltungen von Bild 4.6 und Bild 4.7.

4.6. FET-Prüfer für Anreicherungs-MOSFET

Anreicherungs-FET sind stets MOSFET und haben häufig eingebaute Gateschutzdioden gemäß Bild 2.4b (vgl. dazu Abschnitt 3.3.2.!). In Bild 4.6 und Bild 4.7 werden 2 für diese FET-Art geeignete Prüfschaltungen gezeigt. Beide sind außer für die dargestellten p-Kanal-Anreicherungs-MOSFET (z. B. DDR-Typen *SMY 50, SMY 51, SMY 52, U 105 D*) auch für entsprechende n-Kanal-Typen geeignet, wenn man Betriebsspannung, Meßinstrument und die Z-Diode umpolt. Bild 4.6 zeigt zunächst eine einfache Prüfschaltung für schnelle Sortierprüfungen und Kontrollen, die im Gebrauchswert derjenigen für Verarmungstypen nach Bild 4.5 vergleichbar ist. Mit ihr wird die Schwellenspannung U_T gemessen und die Gateisola-

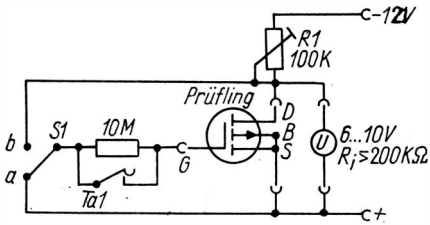


Bild 4.6 Einfache Schaltung zum Messen von Anreicherungs-MOSFET (für n-Kanal-Typen Batterie umpolen!) mit vorhandenem Vielfachmesser

tion geprüft. Für U eignet sich ein Vielfachmesser mit Meßbereich $\approx$ 10 V und einem Eigenstromverbrauch von höchstens 50 μA. $R1$ wird bei *nicht* eingesetztem Prüfling einmal so abgeglichen, daß das Voltmeter, dessen Skalenendwert um wenigstens 2 ... 3 V unter der Betriebsspannung liegen muß, genau Skalenendausschlag anzeigt. Danach schließt man den Prüfling an. Mit S1 in Stellung a darf sich der Vollausschlag des Instruments nicht verringern. Wenn das vor dem Schließen von Ta1 beobachtet wird, weist der Prüfling einen Drainreststrom bei fehlender Gatespannung auf, der erheblich über dem zulässigen Wert von etwa 0,1 μA liegt. Verringert sich der Instrument-Vollausschlag erst beim Schließen von Ta1, ist immer ein Gatefehler die Ursache.

Die Schwellenspannung U_T kann, nachdem S1 in Stellung b gelegt wurde, unmittelbar mit genügender Genauigkeit an U abgelesen werden. Auch bei geringen U_T-Werten nicht auf niedrigeren Meßbereich des Instruments schalten, sonst wird der U_T-Wert verfälscht! Während der U_T-Messung (S1 in Stellung b) erfolgt nochmals Gatekontrolle durch Schließen von Ta1. Der angezeigte U_T-Wert darf sich um maximal 10% verringern. Bei Exemplaren ohne integrierte Gateschutzdiode soll er sich nicht ändern, in keinem Fall darf er sich erhöhen. Verhält sich der Prüfling anders, besteht Verdacht auf mangelhafte Gateisolation, und dann ist auch der angezeigte U_T-Wert mit u. U. erheblichem Meßfehler behaftet.

Eine gründlichere Datenermittlung erlaubt die Schaltung

nach Bild 4.7, die eine Erweiterung des Prinzips nach Bild 4.6 darstellt. Diese Anordnung eignet sich wiederum vorteilhaft als „Gerätebaustein" (bei Bedarf mit Batterie und Vielfachmesser ergänzt). Zunächst wird der Vielfachmesser ohne Prüfling bei U angeschlossen (angegebene Daten beachten!), $R1$ einmal genau auf Vollausschlag bei U abgeglichen und später nicht mehr verändert. Mit Stufenschalter S1 in Stellung 1 (entspricht a des S1 in Bild 4.6) darf nach Einsetzen des Prüflings der Vollausschlag für U nicht unterschritten werden. In Stellung 3 von S1 liest man bei U den U_T-Wert (R_i des Meßinstruments nicht unter 200 kΩ!) ab. Auch hier wird mit Ta1 nochmals die Gateisolation geprüft, wofür die gleichen Kriterien, wie bei Bild 4.6 (dort S1 in b) gelten. Für beide Schaltungen gilt außerdem: Zeigt ein Prüfling in Stellung 3 bzw. Stellung b des S1 Vollausschlag an U, so ist Gatekurzschluß oder eine Zuleitungsunterbrechung anzunehmen. Geht U beim Schließen von Ta1 auf einen Wert unter 1 V oder nahe Null zurück, so ist Gatekurzschluß gegen Source vorhanden. Dieser Prüfling ist natürlich unbrauchbar.

Die Schaltung nach Bild 4.7 gestattet außerdem noch eine Steilheitsmessung und Drainstromkontrolle bei verschiedenen Gatespannungen. Hierzu wird S1 in Stellung 2 gebracht. Mit P1 kann eine durch die Z-Diode konstantgehaltene wählbare Gatespannung angelegt werden. Der bei I anzuschließende Strommesser mißt den zu dieser Gatespannung gehörenden Drainstrom (maximal 20 mA nicht überschreiten!). Für I eignet

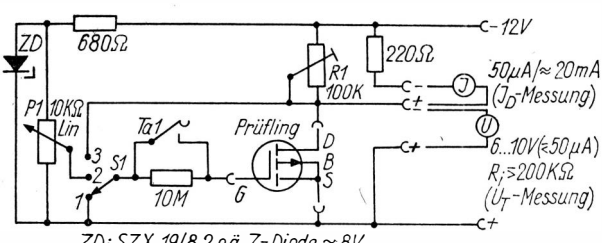


Bild 4.7 Durch geringe Erweiterung der Schaltung nach Bild 4.6 lassen sich Drainstrom und Steilheit erfassen

sich ebenfalls der Vielfachmesser. U ist bei Drainstrommessung abzutrennen! P1 wird mit einer möglichst großen, genau ablesbaren Skaleneichung in Volt versehen. Ist für I ein zweiter Strommesser (15 ... 25 mA) vorhanden, kann man den Vielfachmesser mit seinem 10-V-Bereich parallel zu Schleifer P1 und unteren Anschluß von P1 (Source) legen und die Gatespannung unmittelbar ablesen, was genaueres Arbeiten ermöglicht und keine Skaleneichung an P1 erfordert.
Die Z-Diode kann nur entfallen, wenn man P1 Steckbuchsen für den Voltmeteranschluß vorsieht. Mit P1 läßt sich die vollständige U_G/I_D-Kennlinie des Prüflings aufnehmen (Kennlinien für DDR-Typen in [13]). Wird beim interessierenden Drainstrom die Gatespannung mit P1 um genau 1 V verändert, so entspricht die dabei an I ablesbare Drainstromänderung unmittelbar der Steilheit S bzw. y_{21} in mA/V bzw. mS. Solange man 20 mA Drainstrom nicht überschreitet, denn dies ist für viele Typen bereits der zulässige I_D-Grenzwert, wird der Prüfling mit maximal 150 mW belastet, was für fast alle FET-Typen dieser Art zugelassen ist. Im Zweifelsfall beschränkt man sich auf Drainströme bis maximal 10 mA. Die für einen Drainstrom von 10 μA an P1 gefundene Spannung ist exakt der Wert für U_T entsprechend den Hersteller-Datenblättern. Weitere Hinweise zu derartigen Messungen enthalten [12], [13].

4.7. Kombiniertes Transistorprüfgerät

Zur Problematik kombinierter, komplizierter und unübersichtlicher Transistorprüfgeräte für „möglichst viele" Transistorarten wurde bereits in Abschnitt 1. Stellung genommen. Ein kombiniertes Prüfgerät, mit dem npn- und pnp-Transistoren aller Leistungsklassen, FET sämtlicher Arten, Thyristoren und verschiedene Diodenarten prüfbar sind, ist für den interessierten Amateur als nachbaufähiges Beispiel in [19] zu finden. Dessen Konzeption spiegelt aber auch die angedeutete Problematik wider, u. a. bestehen erhebliche Überlastungsgefahren für den Prüfling bei unachtsamer oder falscher Bedienung. Im folgenden wird daher nur die inzwischen gut bewährte,

schon in [9] gezeigte Kombination eines Transistorprüfgerätes für Bipolartransistoren (Germanium, Silizium, pnp und npn, Leistungsklassen < 1 W und > 1 W) und n-Kanal-Verarmungs-MOSFET (oder SFET vom n-Kanal-Typ) vorgestellt. Bipolartransistoren werden nach dem bei Bild 4.1 angewendeten Verfahren, MOSFET nach dem bei Bild 4.4 benutzten Prinzip (in vereinfachter Form) gemessen. Zusätzlich ist für alle prüfbaren Transistoren ein Test auf Rauschverhalten möglich. Anreicherungs-FET und p-Kanal-FET sind mit diesem Gerät nicht prüfbar. Als Ergänzung sollte man deshalb ggf. eine Einrichtung nach Bild 4.7 oder Bild 4.6 bereithalten, um auch für die „restlichen" Fälle (insbesondere DDR-Typenreihe SMY ...) bei FET gerüstet zu sein.

Alle Prüfvorgänge werden mit drei 6teiligen Miniaturtastenschaltern (wie man sie als Bereichwahlschalter für Rundfunkempfänger, Kanalwähler u. ä. verwendet) ausgeführt. Bild 4.8 zeigt die Gesamtschaltung des Prüfgeräts. Es ist keineswegs so aufwendig, wie die Kontaktanzahl auf den ersten Blick vermuten läßt. Das Gerät besteht im wesentlichen aus dem 1-mA-Instrument I, dem Rauschprüfverstärker RV (seine Schaltung zeigt Bild 5.4) sowie etwa 20 Widerständen, die man sämtlich direkt an den untereinander verdrahteten Kontakten der Tastenschalter anordnet. Bis auf den als gesonderte Baueinheit einzusetzenden Rauschtestverstärker RV ist deshalb keine besondere Montagefläche oder Leiterplatte erforderlich. Das Meßinstrument wird zusammen mit den 3 Tastenschaltern und den Prüflingsanschlüssen (einer üblichen Transistorsteckfassung für MOSFET, einer weiteren für Bipolartransistoren und parallel zu dieser ggf. Krokodilklemmen für den Anschluß abweichender Transistorbauformen) in der Frontplatte des Geräts montiert. Zum besseren Verständnis gibt Bild 4.9 die Anordnung und zweckmäßige Beschriftung der drei 6teiligen Tastenschalter wieder. Bild 4.10 zeigt am Beispiel einer einzelnen Taste (Tastenkontakte I1) die Kontaktbelegung. Die Zuordnung der Kontaktbezeichnungen aus Bild 4.8 zu den Tasten in Bild 4.9 ist danach ohne weiteres verständlich. Alle Kontakte a, b, c sind Arbeitskontakte (schließen bei gedrückter Taste) und d, e, f Ruhekontakte

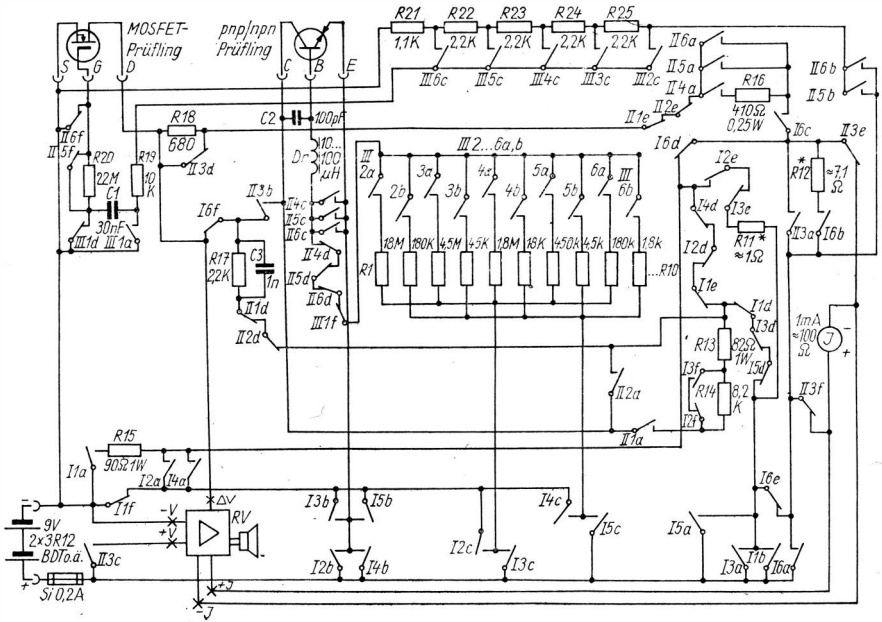


Bild 4.8
Kombiniertes Transistorprüfgerät (Geräteschaltung). Geprüft werden npn- und pnp-Bipolartransistoren (Germanium und Silizium) aller Leistungsklassen sowie n-Kanal-Verarmungs-MOSFET und n-Kanal-SFET. Die Prüfung wird stets auf das Prinzip nach Bild 4.1 oder Bild 4.4 zurückgeführt. Schaltung des Rauschtestverstärkers RV siehe Bild 5.4. Die Bedienung erfolgt mit 3 Tastenschaltern

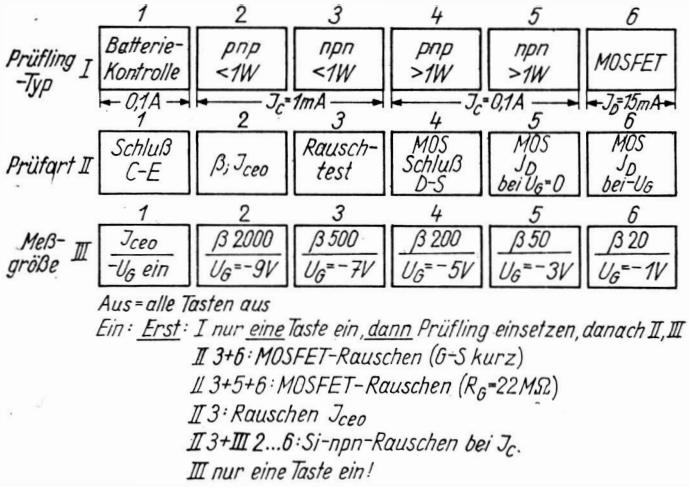


Bild 4.9 Anordnung und Funktionsbeschriftung der 3 Bedienungstastenschalter zum Prüfgerät nach Bild 4.8

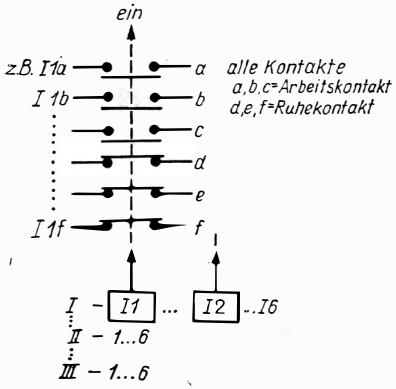


Bild 4.10
Belegung der Kontakte einer Taste (zu Bild 4.8 und Bild 4.9)

(öffnen bei gedrückter Taste). Die Tasten jedes Schalters I, II oder III wurden in üblicher Weise untereinander gekoppelt und sind einrastend, d. h., bei Eindrücken einer Taste springen die zuvor in der gleichen Reihe gedrückten heraus. Durch halbes Eindrücken einer Taste kann man sämtliche Tasten ausklinken, mehrere zugleich gedrückte Tasten rasten gleichzeitig ein. Da auf jeder Taste 3 Arbeits- und 3 Ruhekontakte vorhanden sind, werden Kontakte, deren Bezeichnung in Bild 4.8 fehlt, nicht angeschlossen. Darüber hinaus wurden durch das Ausnutzen vorhandener, vom Prinzip her nicht benötigter Kontakte und ihre zweckmäßige Verknüpfung eine Sicherheit gegen Fehlbedienung geschaffen und einige zusätzliche Tests ermöglicht. Die Meßschaltung läßt sich, je nach gedrückten Tasten, stets auf Bild 4.4 oder Bild 4.1 zurückführen. Die Funktionsweise wird am einfachsten bei der Beschreibung der Meßvorgänge (dazu Bild 4.9) verständlich. Zunächst kontrolliert man — ohne Prüfling — die Batterie in Tastenreihe I (Taste I1). Die Batterie (z. B. 6 Monozellen *R 20* o. ä.) ist dabei mit 0,1 A belastet. Instrument I muß Vollausschlag anzeigen. Danach wählt man je nach Prüflingsart und Leistungsklasse die entsprechende Taste in Reihe I (z. B. I6 für MOSFET *SM 103/104*, oder I3 für *SC 206*, *SF 121* usw.). Dadurch wird die richtige Polung von Batterie und Meßwerk sowie dessen Meßbereich (1 mA oder mit Shunt *R* 11 oder *R 12* 0,1 A bzw. 15 mA) erreicht. Die Shuntwiderstände sind je nach Innenwiderstand des Instruments (Sollwert $\approx 100\,\Omega$) einmalig abzugleichen. Der Prüfling wird bei I2, I3 mit maximal 10 mW, bei I4, I5 mit maximal 1 W und bei I6 mit maximal 130 mW belastet. *Erst nach* Wahl der Taste in Reihe I ist der Prüfling anzuschließen. In Reihe I darf man stets nur eine Taste, niemals mehrere zugleich drücken, anderenfalls kann es zu Batteriekurzschluß kommen (deshalb ist Sicherung Si in deren Zuleitung erforderlich). Wieder ausgeschaltet wird später durch halbes Eindrücken einer I-Taste. Die Kontaktkombination bietet Sicherheit gegen Prüflingsbeschädigung durch Verwechseln der Stecksockel oder falls ein MOSFET mit einem Bipolartransistor verwechselt wurde. Nunmehr wählt man den Prüfvorgang in Reihe II. Angenom-

men sei die Prüfung eines npn- oder pnp-Bipolartransistors. Dann ist zunächst Taste III zu drücken, wobei das Instrument I maximal über etwa $^2/_3$ seiner Skalenlänge ausschlagen darf. Wird das Skalenende erreicht, so hat der Prüfling Kollektorschluß. Die Prüfung dann nicht fortsetzen!

Nachfolgend drückt man II2, womit der Reststrom I_{ceo} ablesbar ist. Bei Siliziumtypen kleiner Leistung ist er praktisch Null. Der Meßbereich für I_{ceo} entspricht dem unter Tastenreihe I angeschriebenen. Geringe Restströme lassen sich bei Leistungstypen im 1-mA-Bereich ablesen, wenn man sie mit I2 oder I3 als Kleintypen vorwählt.

Ist der Reststrom bestimmt, wird eine überschlägige subjektive Beurteilung des Rauschfaktors möglich, indem man II3 drückt (Ohne Rauschtestverstärker RV nach Bild 5.4 bleibt II3 unbenutzt, die entsprechenden Kontakte für II3 in Bild 4.8 werden dann in der als Ruhelage dargestellten Weise durchverbunden oder fortgelassen). Nachdem I_{ceo} bestimmt ist, bleibt II2 gedrückt, und zusätzlich wird mit III2 ... 6, mit dem höchsten Bereich beginnend, β bzw. B gemessen. Diese Tasten entsprechen funktionell denen in Bild 4.1. Um bei Germaniumtypen I_{ceo} vom Meßwert bequem abziehen zu können (vgl. dazu Abschnitt 4.1.), läßt sich von der jeweils gewählten β-Taste III2 ... III6 jederzeit auf III1 (Basis offen, I_{ceo}) und umgekehrt umschalten.

Zur Prüfung eines MOSFET wird I6 gedrückt (I-Meßbereich 15 mA, ggf. mit R12 abgleichen!), *danach* der Prüfling eingesetzt und mit Taste II4 auf D-S-Schluß geprüft (Bild 4.4). Instrument I darf dabei nur maximal etwa 90 % des Vollausschlags erreichen. Wird der Vollausschlag überschritten, so liegt D-S-Schluß vor, die Prüfung ist damit beendet. Bei einwandfreiem Verarmungs-MOSFET (oder n-Kanal-SFET, der in gleicher Weise prüfbar ist) muß jedoch ein geringer Drainstrom angezeigt werden. Ist $I_D = 0$, so liegt Drainunterbrechung vor. Nachfolgend kann mit II5 der Drainruhestrom I_{DSS} gemessen werden. Gate ist dabei gegen Source kurzgeschlossen. Zur anschließenden Gateprüfung wählt man verschiedene feste Vorspannungen (statt P1 in Bild 4.4), indem II6 gedrückt wird. Mit den Tasten III2 ... III6 (die Doppelfunktionen

haben) läßt sich die in Bild 4.9 angeschriebene Vorspannung wählen. Für eine Steilheitsmessung würde die vorhandene 2-V-Staffelung allerdings nicht ausreichen. Durch ständigen Wechsel zwischen den Tasten III1 und III2 ... III6 (wobei III1 die Funktion von S1 in Bild 4.4 hat) ermittelt man die Gatespannung, bei der der Drainstrom gerade zu Null wird. Die Abschnürspannung U_P liegt dann in der Nähe des mit III2 ... III6 gewählten U_G-Wertes. Ebenso wie bei Bild 4.4 erfolgt mit III2 ... III6 die Vorwahl, mit III1 das Anlegen der Gatevorspannung. Die Beobachtung des Drainstromwiederanstiegs durch $C1$-Entladung (vgl. $C1$ in Bild 4.4 und Bild 4.8) erlaubt, wie in Abschnitt 4.5. beschrieben, die Beurteilung der Gateisolation. Läßt sich kein Einfluß der verschieden gewählten Gatespannungen auf den Drainstrom erkennen, so ist das Gate defekt.

Für die Auswahl von $C1$ und die Isolationsanforderungen an die zugehörige Verdrahtung gilt das bei Bild 4.4 bereits Gesagte. Schlechte $C1$-Isolation kann ein defektes Gate vortäuschen! Kontakt III1d in Bild 4.8 muß sich öffnen, bevor III1a schließt (bei fast allen üblichen Tastenschaltern ist das bereits der Fall, sonst durch vorsichtige Kontaktjustierung erreichbar), weil sonst beim Betätigen von III1 $C1$ sofort entladen würde. Viele Anwendungen erfordern rauscharme Transistoren. Deshalb wurde RV vorgesehen. Über den in Bild 5.4 vorhandenen Kleinstlautsprecher, der gegenüber Kopfhörer billiger und praktisch zweckmäßiger ist, läßt sich zunächst das Rauschen subjektiv nach Gehör recht gut beurteilen. Ein Vergleich mit einigen unterschiedlich rauschenden Exemplaren schafft sehr schnell die notwendige praktische Erfahrung! Außerdem wird in RV die verstärkte Rauschspannung abgegriffen, gleichgerichtet und dem Instrument zugeführt (über + I, — I an RV). Dadurch ist eine für Auswahl- und Sortierzwecke recht wertvolle Vergleichswertmessung möglich. Vergleichswerte bieten wieder einige rauscharme und stark rauschende Transistoren. Die am Instrument abgelesene Rauschspannung ist allerdings nicht mit den vom Hersteller angegebenen Rauschfaktorwerten F (in dB) in Zusammenhang zu bringen, was aber für den Amateur bedeutungslos ist. Der

Verstärker RV ist über Kontakt II3c nur bei gedrückter Taste II3 „Rauschtest" eingeschaltet, II3e, II3f trennen dabei das Instrument vom Prüflingsstromkreis. Bei den anderen Messungen liegt der Verstärkerausgang stets dem Instrument parallel, was bei der für RV gewählten Schaltungsweise ohne Einfluß auf die Anzeigegenauigkeit bleibt. Über II3a wird für die Rauschprüfung der Kollektorstromkreis geschlossen und über II3b der Lastwiderstand $R17$ eingeschaltet. $C3$, $C2$ und Dr verhindern eine Selbsterregung des Prüflings im HF-Bereich ($C2$ und Dr sind direkt am Prüflingssockel anzulöten). Die an $R17$ abfallende Rauschspannung gelangt über I6f an den Verstärkereingang. Beim MOSFET- und SFET-Rauschtest fällt die Rauschspannung über $R18$ im Drainstromkreis ab. Germaniumtransistoren testet man zweckmäßig auf Rauschen im I_{ceo}-Bereich, dafür ist lediglich Taste II3 zu drücken. Rauschkontrolle bei höherem Kollektorstrom kann durch gleichzeitiges Drücken einer der β-Bereichstasten (entsprechend der zuvor durchgeführten β-Messung gefunden) vorgenommen werden. Für Siliziumtransistoren drückt man zusammen mit II3 stets eine der β-Bereichstasten III2 ... III6 (bei sehr niedrigem Kollektorstrom stets III2), da anderenfalls kein Kollektorstromfluß und damit über $R17$ auch keine Rauschspannung vorhanden ist. FET-Rauschtests erfordern zugleich mit II3 noch Taste II6. Dabei wird das I_{DSS}-Rauschen bei kurzgeschlossenem Gate erfaßt. Entsprechende Kontrolle bei hochohmigem Gateabschluß (22 MΩ) ist möglich, wenn II3, II5 und II6 gedrückt werden. Die Angaben in Bild 4.9 sagen auch dazu alles Nähere. In der Tastenreihe II kann man also mehrere Tasten zugleich drücken. Fehlschaltungen sind durch die Kontaktkombinationen verhindert. Drücken mehrerer Tasten in Reihe III ist zwar ebenfalls unschädlich, aber naturgemäß sinnwidrig (falsche Meßergebnisse!), wie die Bezeichnungen schon erkennen lassen.

Dieses Prüfgerät ist für schnelle Funktionsproben und Überschlagswertermittlungen, wie sie dem Regelfall in der Amateur- und Werkstattpraxis entsprechen, ausgelegt. Sein Vorteil liegt in der unkomplizierten und übersichtlichen Bedienung, da außer dem Meßinstrument und den Prüflingsanschlüssen für

FET und Bipolartyp nur die 3 Tastenreihen als Bedienorgane vorhanden sind. Der Prüfvorgang wird dadurch sehr übersichtlich und nahezu „narrensicher". Auch die Rauschprüfung hat sich in dieser Form sehr gut bewährt. Die für Amateurzwecke nur selten notwendigen genaueren Datenermittlungen kann man mit einer der vorangegangenen Schaltungen (Bild 4.1 bis Bild 4.7) improvisieren. Geräte mit reiner Tastenbedienung eignen sich gut für das Sortieren ungetypt eingekaufter Bastlerware und zur Schnellauswahl einzelner Exemplare mit geforderten Mindestdaten (wie für die meisten Bauanleitungen angegeben) sowie zur Schnellprüfung fehlerverdächtiger Transistoren.

4.8. Thyristor- und Diodenprüfgeräte

4.8.1. Diodentester

Nach den in Abschnitt 2.5. und Abschnitt 3.5. gegebenen Hinweisen kann man Dioden gewöhnlich schon mit einem einfachen geeigneten Durchgangsprüfer (Ohmmeter des Vielfachmessers) testen. Die Sperrspannungsermittlung erfordert jedoch mehr Aufwand (Abschnitt 5.1.). Falls größere Stückzahlen zu prüfen sind, lohnt sich ein Tester nach Bild 4.11. Er wird aus einem Klingeltransformator für 6 V ~ (KTr) gespeist und läßt sich mit diesem über Steckbuchsen verbinden. Der Trafo ist also noch anderweitig benutzbar. Bei den Prüfanschlüssen I ermittelt man Durchgang (ggf. Kurzschluß) und zugleich die Diodenpolung. Die Lampen La1, La2 werden zweckmäßig seitlich den Anschlußbuchsen I so zugeordnet, daß stets die Lampe aufleuchtet, zu der die Anode des Prüflings weist. Man erkennt dann sofort die Polung des Prüflings, ohne ihn erst „umdrehen" zu müssen. Bewährt haben sich hierfür metallische, etwas hervorstehende Steckbuchsen, an die sich kleinere Prüflinge direkt anhalten lassen. Leuchtet keine Lampe auf, so ist die Diode unterbrochen. Leuchten beide Lampen zugleich auf, hat die Diode Schluß. Die Einrichtung wurde mit dem zweiten Prüfanschluß II erweitert,

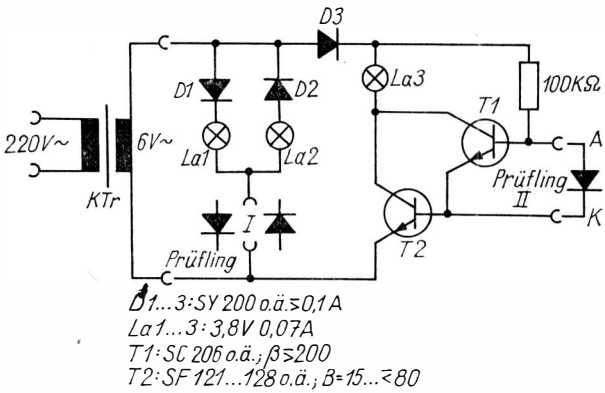


Bild 4.11 Diodentester mit Polaritätsanzeige (Anschlüsse I) und Testmöglichkeit für Germanium/Silizium-Unterscheidung (II)

an dem eine Unterscheidung zwischen Germanium- und Siliziumdioden möglich ist. An II muß der Prüfling richtig gepolt anliegen! La3 leuchtet normalerweise ständig (wenn II offen) und kann als Einschaltkontrolle für das Gesamtgerät dienen. Wird bei II eine Siliziumdiode angelegt, so bleibt La3 hell. Liegt bei II eine Germaniumdiode an, erlischt La3. T1 und dessen Basiskreisdimensionierung gewährleisten dabei die Prüfung mit entsprechend geringem Strom. Bei höheren Strömen können die Durchlaßspannungen an Germaniumdioden bereits in die Nähe Siliziumtypischer Wert kommen! Zu beachten sind die in Bild 4.11 für T1, T2 angegebenen Stromverstärkungswerte: T1 soll hohes β, T2 jedoch niedrigen B-Wert (unter 80!) haben. Ein besonderer Abgleich des Testers ist nicht erforderlich.

4.8.2. Thyristorprüfer

Die Ermittlung der maximal zulässigen Sperrspannung von Thyristoren und Triac erfolgt nach Abschnitt 5.1.2.

Ein überschlägiger Funktionstest ist mit dem einfachen Zusatzgerät nach Bild 4.12 möglich, das ebenso wie der Diodentester (Bild 4.11) aus einem 6-V-Klingeltransformator betrieben wird. Vorteilhaft kann man die Schaltungen nach Bild 4.11 und Bild 4.12 zu einem Gerät vereinen. Der Prüfling wird wie dargestellt angeschlossen (als Thyristor mit seinem Gate an a, Triac an b). Wenn Ta offen ist, darf bei intaktem Prüfling keine Lampe aufleuchten. Leuchtet nur Lampe La2 auf, deutet das auf falsch angeschlossenen Prüfling hin (dies auch, wenn bei Schließen von Ta La2, jedoch nicht La1 aufleuchtet). Leuchten dabei beide Lampen auf, so ist der Prüfling defekt (durchgeschlagen bzw. Kurzschluß). Wenn ein Thyristor geprüft wird, muß beim Betätigen von Ta La1 aufleuchten und La2 erloschen bleiben. Leuchtet bei Betätigung von Ta keine Lampe auf, so ist (außer Falschpolung) ein Defekt des Prüflings anzunehmen. Bei Öffnen von Ta muß La1 wieder verlöschen.

Triac verhalten sich, wenn ihr Gate bei a angeschlossen ist, ebenso. Man kann diese Eigenschaft nutzen, um die zum Gate gehörende Bezugselektrode (Hauptanschluß entsprechend Katode beim Thyristor) zu finden. Wird beim Triac K-A vertauscht (Gate an a), so leuchtet bei Betätigen von Ta keine Lampe auf.

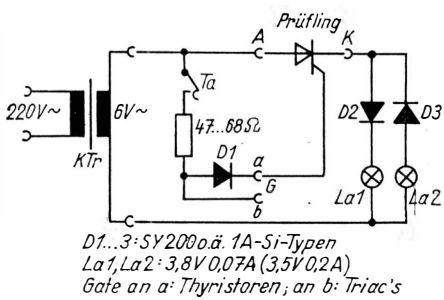


Bild 4.12 Einfacher Thyristor- und Triac-Tester. Das Gate eines Thyristors wird stets bei a, eines Triac bei a oder b angeschlossen

Funktionsprüfung für Triac erfolgt mit Gateanschluß bei b. Jetzt müssen bei Ta-Betätigung beide Lampen aufleuchten und beim Öffnen von Ta beide wieder verlöschen. Anschluß b nur für Triac! Eine Datenermittlung ist bei Thyristoren mit der Schaltung nach Bild 4.13 möglich. Triac lassen sich damit ebenfalls prüfen, wobei die Daten für die entgegengesetzte Betriebsstromrichtung durch Umpolen der Speisespannung (Plus an S2) getrennt aufnehmbar sind. Zunächst ist S1 offen, P1 am unteren Anschlag und P2 steht zu Beginn grundsätzlich auf 0 Ω. Für U und I kann der vorhandene Vielfachmesser nacheinander an den angegebenen Stellen mit den genannten Meßbereichen eingeschaltet werden, es sind also nicht unbedingt mehrere Instrumente erforderlich. Der Prüfling wird zunächst keinen Stromfluß zeigen. Nachdem S1 geschlossen ist, erhöht man mit P1 allmählich die Gatespannung, bis der Thyristor zündet (Einsetzen des Anodenstromflusses). Ihr jeweiliger Betrag ist bei U ablesbar. Die für die Zündung erforderlichen Gatebetriebswerte lassen sich bei U und I im Gatekreis unmittelbar ablesen. Wird S1 ausgeschaltet, so muß der Anodenstromfluß unverändert bestehen bleiben. Ist das auch

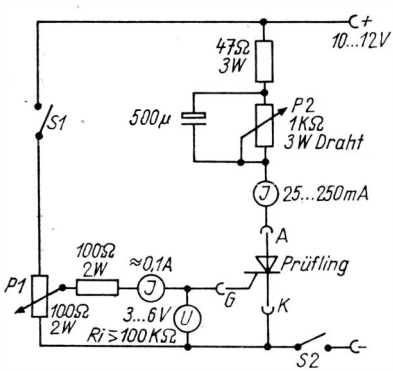


Bild 4.13 Prüfschaltung zur Messung der wesentlichen Kennwerte an Thyristoren und Triac. Ein vorhandener Vielfachmesser kann nacheinander an den angegebenen Stellen eingeschaltet werden

mit P2 = 0 Ω nicht der Fall, so hat der Thyristor wahrscheinlich einen sehr hohen Haltestromwert I_H (über etwa 0,3 A). Nach Ausschalten von S1 kann man I_H jetzt ermitteln, indem P2 langsam nach steigendem R-Wert gedreht und damit der Anodenstrom verringert wird. Bei Unterschreiten des I_H-Wertes geht der Anodenstrom schlagartig auf Null zurück. Der unmittelbar davor abgelesene Anodenstrom ist gleich I_H. Der Elektrolytkondensator parallel zu P2 läßt bei kurzzeitigen Kontaktstörungen in P2 während der Betätigung den Strom nicht vorzeitig abreißen, was bei Drahtreglern gelegentlich vorkommen kann. Er soll möglichst groß bemessen sein und muß, wenn ein Triac mit umgepolter Betriebsspannung in der Gegenrichtung geprüft wird, ebenfalls umgepolt werden. Bei genügend kontaktsicherem P2 ist er überflüssig. Für den mit P2 jeweils eingestellten Anodenstrom kann man bedarfsweise den Durchlaßspannungsabfall am Prüfling parallel zu seinen A-K-Anschlüssen messen. Damit sind auf einfache Weise alle den Amateur interessierenden Betriebswerte des Prüflings (außer der maximalen Sperrspannung) zu ermitteln. S2 ist praktisch, um den Thyristor zwecks Wiederholung der I_H- oder Gatedatenmessung jederzeit bequem wieder löschen zu können.

5. Sonderprüfungen

5.1. Sperrspannungsprüfungen

5.1.1. Transistoren und Dioden

Die Sperrspannungen moderner Halbleiter können sehr groß sein, der Amateur muß also ausnahmsweise mit hohen Spannungen arbeiten. Beim Umgang mit Spannungen über 42 V sind die einschlägigen TGL, Sicherheits- und Arbeitsschutzbestimmungen genauestens zu beachten. Diese Arbeiten sollten deshalb dem erfahrenen und mit den entsprechenden Regeln und Vorschriften vertrauten Amateur vorbehalten bleiben. Hauptinhalt der Vorschriften ist ein absolut zuverlässiger Berührungsschutz aller Hochspannung führenden Teile.
Die Sperrspannungsprüfung (exakt: Ermittlung der Durchbruchspannung) erfolgt nach dem in Bild 3.13 bereits dargestellten Prinzip. Praktisch benutzt man dafür die Schaltung nach Bild 5.1. Da sie auch für Gleichrichterdioden benötigt wird, ist sie (obwohl für Transistoren und Kleindioden selten mehr als 200 V Durchbruchspannung auftreten) für eine mit Amateurmitteln noch relativ einfach bereitstellbare Meßspannung von 1 kV ausgelegt. Transformator Tr ist ein normaler Rundfunk-Netztransformator (z. B. der bekannte Universaltyp *N 85 U* oder ähnliche mit zweimal 320 V ~), La dient als Einschaltwarnung. Die gesamte Schaltung bis zu den Anschlußklemmen für Prüfling und Vielfachmesser U (mit 1-kV-Bereich) muß vollständig berührungssicher verschlossen sein! Für Ta1 und Ta2 benutzt man Mikrotaster, die mit dem Deckel einer nach [15] aufgebauten Isolierbox kombinierbar sind, oder andere zuverlässig isolierte, mindestens für Netzspannung zugelassene Tasten, die aus Sicherheitsgründen nicht einrasten dürfen. Obwohl Ta1 und Ta2 gleichzeitig zu betätigen sein müssen, sollten sie nicht gekoppelt und eventuell so montiert sein, daß zu ihrer Bedienung beide Hände benötigt

werden. Man kommt dadurch weniger leicht in die Versuchung, den womöglich noch unter Spannung stehenden Prüfling oder die Meßgerätklemmen ungewollt zu berühren. Sobald Ta1 und Ta2 geschlossen sind, steht an *C*1 eine Prüfspannung von annähernd 1 kV. Bei Öffnen der Tasten wird diese Spannung über *R*3 schnell wieder abgebaut. Bei X + und X — erfolgt außerdem Anschluß der später beschriebenen Prüfschaltung

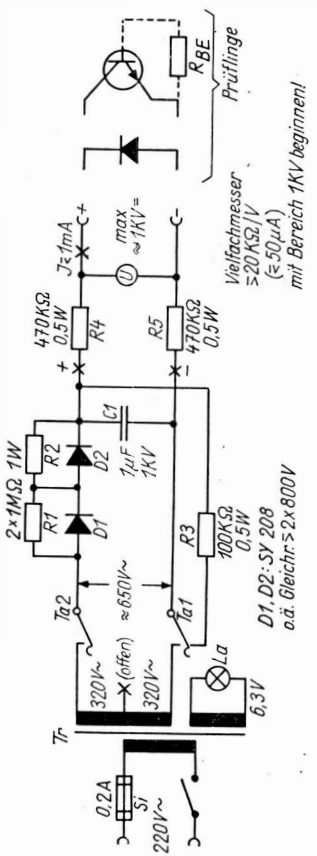


Bild 5.1
Stromlaufplan für ein Prüfgerät zur Bestimmung von Durchbruchspannungen an Halbleitersperrschichten. Feldeffekttransistoren dürfen nach diesem Verfahren nicht geprüft werden. Statt D1, D2 und *R*1, *R*2 kann als preisgünstigere Lösung eine Gleichrichterröhre *EZ* 80 oder *EZ* 81 verwendet werden. Bei + X, — X kann statt *R*4, *R*5 die Schaltung nach Bild 5.2 angeschlossen sein; Kombination beider zu einem Gerät ist vorteilhaft

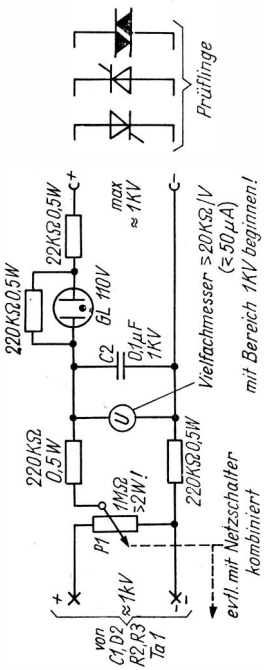


Bild 5.2
Stromlaufplan zur Bestimmung der Durchbruch- bzw. Kippspannung an Halbleitern mit Kippverhalten (Thyristoren, Triac, Diac, VD). Feldeffekttransistoren dürfen nach diesem Verfahren nicht geprüft werden. Die Stromversorgung bei + X, — X erfolgt gemäß Bild 5.1

(Bild 5.2), das Netzgerät ist also für beide Schaltungen das gleiche.

R4, *R5* (aus Sicherheitsgründen auf beide Prüflingsleitungen verteilt!) begrenzen den durch den Prüfling fließenden Strom in der bereits bei Bild 3.13 beschriebenen Weise auf maximal 1 mA. Der Prüfling wird mit maximal 250 mW belastet und dadurch nicht beschädigt. Dieser Maximalwert tritt nur in Nähe von Durchbruchspannungen um 500 V auf, liegt also für Transistoren und Kleindioden entsprechend niedriger. Dioden aller Art lassen sich in der angedeuteten Polung anschließen. Für Transistoren ist der Anschluß von npn-Typen dargestellt, pnp-Typen sind selbstverständlich mit Emitter nach Pluspol

anzuschließen. Der parallel zum Prüfling liegende Vielfachmesser steht zunächst stets auf höchstem Bereich 1 kV und wird nur bei Bedarf auf niedrigere Bereiche geschaltet (nach Ablesen sofort wieder auf 1 kV zurückschalten!). Sobald Ta1, Ta2 geschlossen sind, ist an ihm unmittelbar die Durchbruchspannung des Prüflings abzulesen. Die maximal zulässige Sperrspannung nimmt man je nach Bauelementtyp und beabsichtigter Verwendung mit 60% bis höchstens und nur für Silizium-Bauelemente 90% des so gemessenen Wertes an. Bei Transistoren wird mit offener Basis auf diese Weise der Grenzwert U_{ceo} ermittelt (vgl. dazu Bild 2.1 und zugehörigen Abschnitt). Wird der Prüfling mit einem Basis-Emitter-Widerstand R_{BE} (punktiert angedeutet) versehen, so mißt man die für dessen R-Wert gültige U_{ceR}.
Mit dieser Schaltung können außer FET alle Halbleiter geprüft werden, die kein Schaltverhalten zeigen. Bei Z-Dioden liest man an U unmittelbar den für etwa 1 mA gültigen U_Z-Wert ab.

5.1.2. Thyristoren, Triac, Diac, Vierschichtdioden

Bei Bauelementen mit Kippverhalten ist die Schaltung nach Bild 5.1 nicht anwendbar, weil nur der Durchlaßspannungsabfall am gezündeten Prüfling abgelesen würde. Man benutzt für diese Bauelemente dann die Schaltung nach Bild 5.2, die an den Anschlußpunkten X +, X — ebenfalls aus dem Netzteil gemäß Bild 5.1 betrieben wird. Hier ist außerdem auf berührungssichere Isolierung des Bedienknopfes für P1 zu achten. Mit P1 läßt sich die Prüfspannung langsam erhöhen, es sollte ein mit wenigstens 2 W belastbares 1-MΩ-Potentiometer sein. Geeignet dafür sind die entsprechend großen Bauformen von Lautstärkereglern aus älteren Rundfunkgeräten der Röhrentechnik. Entsprechende Potentiometer sind auch z. B. für Boosterspannungseinsteller in den Zeilenendstufen von Fernsehgeräten handelsüblich. Am Meßinstrument sind 2 gesonderte Anschlußpunkte (Isolierbuchsen) notwendig. Man kann die Anordnung vereinfachen, indem $C2$ und die Glimmlampe

entfallen. Bis auf den hinzugekommenen P1 entspricht die Schaltung dann dem Bild 5.1. Die erfolgte Zündung des Bauelements erkennt man am schlagartigen Rückgang der Instrumentanzeige. Der unmittelbar davor abgelesene Spannungswert ist die gesuchte maximal zulässige Sperrspannung. Sie darf in der Praxis nicht voll ausgenutzt werden. In Bild 5.2 wurde mit Gl eine praktisch etwas günstigere Lösung gewählt. $C2$ bildet mit Glimmlampe Gl (einem 110-V-Typ ohne eingebauten Vorwiderstand; Signal-Kleinglimmlampe, Röhrchenglimmlampe aus Polprüfstift o. ä.) und dem Prüfling eine Kippschaltung (dazu [9]). Mit P1 wird nach Anschluß des Prüflings die Spannung, von Null beginnend, langsam erhöht. Sobald man die maximale Sperrspannung des Prüflings überschreitet, schaltet dieser auf sehr niedrigen Durchlaßwiderstand um, womit $C2$ über Gl schlagartig entladen wird. Gl blinkt auffällig sichtbar auf. Der 22-kΩ-Vorwiderstand begrenzt den Entladestrom auf einen für alle in Frage kommenden Prüflinge und Gl noch zulässigen Wert. $C2$ wird so weit entladen, bis Gl verlischt, danach erfolgt neue Aufladung. Wenn der Prüfling sehr niedrigen Haltestrom I_H unter 1 ... 2 mA hat, zeigt Gl Dauerlicht. Man dreht P1 stets zunächst so weit auf, bis Gl aufleuchtet bzw. zu blinken beginnt, und nimmt dann P1 wenig zurück, bis Gl nicht mehr blinkt bzw. noch nicht wieder aufleuchtet. Die danach ablesbare Spannung ist die maximale Sperrspannung des Prüflings. Gl und $C2$ ermöglichen also ein eindeutigeres Auffinden dieses Spannungswertes mit P1. Es kommt vor, daß die maximale Sperrspannung für Gleichrichter und Thyristoren oder Triac über 1 kV liegt. An U wird die volle Leerlaufbetriebsspannung von etwa 1 kV angezeigt. Da es für den Amateur ausreicht zu wissen, daß das Bauelement mit mindestens 1 kV belastbar ist, sind höhere Prüfspannungen als 1 kV weder notwendig noch zweckmäßig. Die Prüflinge werden, wie in Bild 5.2 angedeutet, angeschlossen. Das Gate bei Thyristoren oder Triac bleibt dabei grundsätzlich offen. Mit Anode an Pluspol mißt man bei Thyristoren die sogenannte „Nullkippspannung". Gleiches gilt für Triac in beiden Polungen. Mit Katode an Plus wird beim Thyristor die Sperrspannung gemessen. Für den

praktischen Einsatz dieser Bauelemente sollte man jedoch maximal 50% des niedrigsten in beiden Polungen ermittelten Wertes als betrieblich zulässige Scheitelspannung ausnutzen. Für Netzstromkreise vorgesehene Thyristoren und Triac sollen bei dieser Prüfung wenigstens etwa 600 V Durchbruchspannung zeigen! Bei Vierschichtdioden gilt diejenige Polung als richtig, die die niedrigere Zündspannung ergibt. P1 stets langsam aufdrehen und bei Vierschichtdioden nicht sehr weit über den Glimmlampen-Einsatzpunkt hinaus betätigen, um insbesondere bei falsch gepolten VD den Zündstoßstrom möglichst niedrig zu halten! Der parallel zu Gl liegende Widerstand 220 kΩ unterbindet den Einfluß von Sperrströmen oder Vorströmen (bei VD und Diac) auf Gl. Solange Gl blinkt oder Dauerlicht zeigt, ist der bei U ablesbare Wert nicht realistisch!

5.2. Rauschtester für Transistoren

Für Amateurzwecke genügt es, das Rauschverhalten nur im NF-Bereich und auch da nur nach überschlägigen Vergleichsverfahren (für schnelle Auswahlzwecke aus vorhandenem Vorrat) durchzuführen. Der Amateur wird fast immer einen beliebigen NF-Verstärker mit einer Eingangsempfindlichkeit um 1 mV (Mikrofoneingang) zur Verfügung haben. Behelfsmäßig geeignet sind dafür Mikrofoneingänge an Magnetbandgeräten, Kassettenrecordern usw., die ein Mithören während der Mikrofonaufnahme ermöglichen, oder andere beliebige NF-Verstärker, die ohne besondere Anforderungen an Klangqualität, Lautstärke o. ä. das Abhören eines „Mikrofon"-Eingangs gestatten. Der vorhandene Verstärker oder ein eigens für diesen Zweck sehr einfach aufzubauender, mit billigen oder gerade vorhandenen Einzelteilen bestückter kleiner NF-Verstärker eignet sich zum Abhören des Transistorrauschens mit einer Ergänzung nach Bild 5.3. Der Diodenstecker wird mit dem (empfindlichsten) Eingang des nachfolgenden Verstärkers verbunden. Den zu überprüfenden Transistor schließt man bei B, C, E an (für pnp-Typen Batterie umpolen!). Er kann ein beliebiger Germanium- oder Siliziumtyp sein. Auch

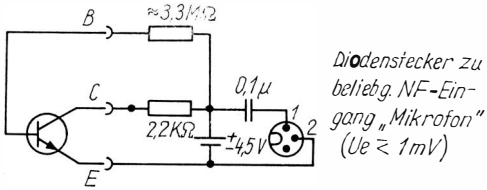


Bild 5.3 Einfache Hilfsschaltung zur gehörmäßigen Überprüfung des NF-Rauschens von bipolaren Transistoren. Auch für Feldeffekttransistoren verwendbar. Der Diodenstecker wird an einen beliebigen NF-Verstärker (Eingangsempfindlichkeit $\leq$ 1 mV) angeschlossen

FET lassen sich auf diese Weise prüfen. Das Gate wird stets bei B angeschlossen, für Anreicherungs-FET kommt der Drain an C, für SFET und Verarmungs-FET kommt der Drain an E. Die Batteriespannung sollte für FET 8 ... 9 V betragen, sie ist entsprechend dem FET-Kanaltyp richtig zu polen. Wenn stets die gleiche Prüfeinrichtung (gleiche Batteriespannung und gleiche *R*-Werte, auch der gleiche NF-Verstärker mit stets gleichbleibender, ggf. markierter Verstärkungseinstellung) benutzt wird, gewinnt man durch subjektiven Vergleich mit rauscharmen und stark rauschenden Transistoren schnell die nötige Erfahrung, um den Prüfling hinreichend genau beurteilen zu können. Da für den Amateur ja nur die Eignung des Prüflings für einen vorgegebenen Zweck interessiert, ist für ihn eine exakte Rauschfaktormessung weder notwendig noch vom Aufwand her vertretbar.

Für das Transistorprüfgerät nach Abschnitt 4.7 (Bild 4.8, dort „RV") kann als Ergänzung die Schaltung nach Bild 5.4 benutzt werden. Es handelt sich um einen 3stufigen direktgekoppelten NF-Verstärker, der speziell für die Schaltung nach Bild 4.8 bemessen wurde. Für die Übertrager eignen sich außer den älteren, bei vielen Amateuren noch in der Materialkiste vorhandenen Kleinübertragern *K 20* und *K 21* auch andere, datenähnliche. Mit geeigneten Ferritschalenkernen lassen sich die Übertrager leicht selbst herstellen (Daten und Austauschhinweise im Anhang von [9]!). Zumindest für den *K 20* ist

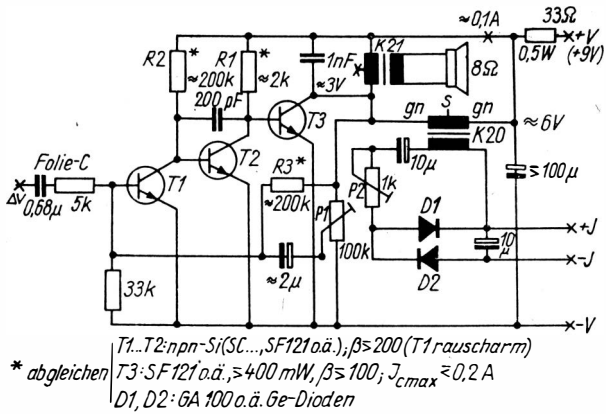


Bild 5.4 Stromlaufplan des Rauschtestverstärkers zu Bild 4.8. Er tritt in Bild 4.8 an die Stelle von RV

hier wegen der erforderlichen galvanischen Trennung des Gleichrichterkreises nicht ohne Übertrager auszukommen. Die Schaltung Bild 5.4 ist mit den gleichnamigen Anschlußpunkten in Bild 4.8 zu verbinden.

*R*1 ... *R*3 sind abhängig von den Exemplardaten der T1 ... T3. Man bestimmt sie mit kleinen Einstellreglern wie folgt: Zunächst *R*2 fortlassen und Basis T1 gegen Emitter kurzschließen. Jetzt mit *R*1 die Kollektor-Emitter-Spannung an T3 auf ≈ 0,3 ... 0,5 V einstellen. Dabei sollen in „+ V" etwa 0,2 A fließen. *R*1 nicht kleiner wählen, als hierfür nötig ist! Danach setzt man *R*2 ein und verringert ihn so weit, bis die Kollektorspannung an T3 etwa 7,5 ... 8,2 V beträgt. Zuletzt wird der Basis-Emitter-Kurzschluß an T1 aufgehoben und *R*3 so bemessen, daß am Kollektor T3 etwa 3 ... 3,2 V stehen. Bei „+ V" sollen nun etwa 100 mA fließen. In Bild 5.4 sind für *R*1 ... *R*3 Richtwerte angegeben, die je nach β-Werten der T1 ... T3 relativ stark abweichen können.

Mit P1 ist eine Verstärkungsregelung möglich. Man stellt P1 so ein, daß bei fehlendem Prüfling (des Transistorprüfers) noch kein merkbares Eigenrauschen des RV auftritt. P1 und

der 2-μF-Kondensator können entfallen, wenn ohne sie die Gesamtverstärkung nicht bereits zu groß ist. Falls HF-Selbsterregung auftritt, kann sie mit einem kleinen Parallelkondensator zu $R3$ (10 ... 100 pF) beseitigt werden. Nach Einbau des RV in das Transistorprüfgerät wird mit einigen stark rauschenden (fehlerhaften) Prüflingstransistoren P2 in Bild 5.4 auf Instrumentvollausschlag (Bild 4.8) eingestellt. Bei späteren Transistormessungen läßt sich deren relatives Rauschen nach dem Instrumentausschlag beurteilen.

5.3. Grenzfrequenztester

Prüfschaltungen für die HF-Grenzfrequenz von Transistoren werden nicht behandelt. Ihr Wert ist in der Amateurpraxis, wenn der Aufwand für die Prüfschaltung in sinnvollen Grenzen bleiben soll, recht zweifelhaft. Da bei der Beurteilung der Eignung für einen vorgesehenen HF-Anwendungszweck allzu viele Randbedingungen (vorgesehene Schaltung und deren jeweilige Dimensionierung usw.) mitspielen, sind Grenzfrequenzaussagen, die mit einigermaßen einfachen Testern gewonnen werden, meist sehr unzuverlässig. Im Zweifelsfall kann man ohnehin nur nach der Einsatzerprobung direkt im vorgesehenen Gesamtgerät urteilen. Für entsprechende Testschaltungen für FET und MOSFET sei auf [20] und die dort angegebenen weiteren Literaturstellen verwiesen.

6. Hinweise zu möglichen Meßfehlern beim Ausmessen von Transistoren

Beim Messen von Bipolartransistoren (insbesondere Germanium-HF-Typen und Silizium-Planartypen) mit einer der vorstehend angegebenen und ähnlichen Prüfschaltungen kommt es gelegentlich zur HF-Selbsterregung des Prüflings. Ursache sind die inneren Transistorsperrschichtkapazitäten zusammen mit den unvermeidlichen Zuleitungsinduktivitäten zum Prüflingsanschluß. Deshalb wurde in der Schaltung nach Bild 4.8 bereits $C2$ und Dr vorgesehen. Derartige Fehlererscheinungen können unbemerkt bleiben und das Meßergebnis erheblich verfälschen. Falls man beim Annähern der Hand an den Prüfling oder beim Berühren seines Kollektor- oder Emitter-Anschlusses eine Änderung des angezeigten β-Wertes bemerkt, ist Selbsterregung (und falsche β-Anzeige!) wahrscheinlich. Man kann diese Erscheinung durch Parallelschalten eines kleinen Kondensators zu Basis-Kollektor des Prüflings beseitigen (Bild 5.5). Dieser Kondensator muß aber eine HF-taugliche Ausführung und mit kürzestmöglichen Anschlüssen am Prüfling angeordnet sein. Geeignet sind Keramikkondensatoren, die man mit dem Prüfling an die Prüflingsfassung anklemmt. Übrigens kann diese Erscheinung sehr wohl auch bei Silizium-Leistungstransistoren (NF-Endstufentypen) auftreten, wo man sie kaum erwartet. Die Gegenmaßnahme ist die gleiche, der Kondensator sollte bei Leistungstransistoren mit 0,1 μF oder auch größer gewählt werden.

Nicht beobachtet wurden derartige Erscheinungen bei FET. Hier kann aber u. U. gelegentlich ein anderer Effekt stören:

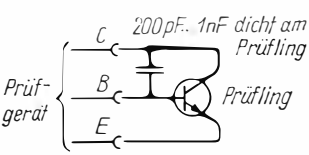


Bild 5.5
Zusatzkondensator zur Verhinderung von HF-Selbsterregung beim Prüfen von Bipolartransistoren

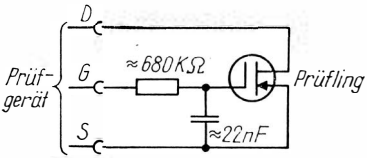


Bild 5.6
Zusatzbeschaltung der Gateleitung von Feldeffekttransistoren, falls bei Funktionsprüfungen Störspannungen den hochohmigen Gatekreis beeinträchtigen. R und C müssen dicht am Prüfling angeordnet sein; eventuell genügt allein der Kondensator

Die Hochohmigkeit der Gatezuleitung während der Prüfung. Mitunter kommt es zu störenden HF- oder (meist)netzfrequenten Einstreuungen kapazitiv auf die Gateleitung. Die solchermaßen „verbrummte" Gatespannung ergibt eventuell ebenfalls Meßfehler. In diesem Fall beschaltet man das Prüflings-Gate mit einem *RC*-Glied gemäß Bild 5.6. Der Gatevorwiderstand beeinträchtigt die Messung (wenn zuvor das Gate auf intakte Isolation geprüft wurde) nicht. In eine Gate-Isolationsmessung geht jetzt aber der Isolationswiderstand des Kondensators (der deshalb sehr hoch sein soll) mit ein.

Bei Bipolartransistoren kann es vorkommen, daß man versehentlich Emitter und Kollektor des Prüflings vertauscht. Ein solcher „invers" betriebener Bipolartransistor zeigt (bei Germaniumtypen) meistens ein besonders gutes I_{ceo}-Verhalten und geringes Rauschen, weist aber einen gegenüber der richtigen Polung erheblich verringerten β-Faktor auf. Diesen Umstand kann man durch Vergleich beider β-Werte zur Unterscheidung von Emitter und Kollektor benutzen, deren probeweise Vertauschung bei allen hier angegebenen Prüfschaltungen ohne Bedenken zulässig ist.

FET, deren Drain und Source vertauscht wurde, können sich je nach Typ ähnlich verhalten, ohne daß aber hieraus irgendwelche Rückschlüsse möglich sind.

LEER

7. Literaturhinweise

[1] *Jakubaschk:* Das große Schaltkreisbastelbuch; Militärverlag der DDR, Berlin 1978

[2] *Kramer:* Impulstechnik mit TTL-Schaltkreisen; Band 156 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1977

[3] *Kühne:* Schaltbeispiele mit TTL-Gattern der Schaltkreisserie D 10 Teil 1 und Teil 2; Band 141 und Band 155 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1976 und 1977

[4] *Streng:* Analoge Integrierte Schaltkreise von TESLA; Band 142 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1976

[5] *Streng:* Transistordaten; Militärverlag der DDR, Berlin 1975 (2. Auflage 1977)

[6] *Kühne:* Meßschaltung zur oszillografischen Aufnahme von Transistor- und Diodenkennlinien; radio-fernsehen-elektronik 24 (1975) H. 8, S. 255 ff.

[7] *Schreiber:* Treppenspannungsgenerator zur oszillografischen Darstellung von Kennlinienfeldern; Funktechnik, 1974, H. 24, S. 861 ff.

[8] *Arnoldt:* Ausgangs-Kennlinienschreiber — Exakte Messungen an Zwei- und Vierpolen; Funktechnik 1976, H. 8, S. 237 ff., und H. 9, S. 281 ff.

[9] *Jakubaschk:* Das große Elektronikbastelbuch: Militärverlag der DDR, 4. Auflage, Berlin 1975, 5. Auflage, Berlin 1976

[10] *Jakubaschk:* Amateurtontechnik; Militärverlag der DDR, 2. Auflage Berlin 1975

[11] *Schlenzig:* Silizium-Schaltungs-Mosaik; Original-Bauplan Nr. 18, Militärverlag der DDR, Berlin 1971

[12] *Lessen:* Feldeffekttransistoren-Eigenschaften und Anwendung; Band 131 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1974

[13] *Jakubaschk:* MOSFET-Schaltungspraxis, Teil 1; Band 143 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1976
[14] *Pilz:* Thyristoren — Eigenschaften und Anwendung; Band 139 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1975
[15] *Schlenzig:* Thyristor-Lampensteller; Original-Bauplan Nr. 31, Militärverlag der DDR, Berlin 1976
[16] *Pilz:* Basteln mit Thyristoren; Band 140 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1976
[17] *Jakubaschk:* Komplementärschaltungstechnik; Band 154 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1977
[18] *Jakubaschk:* Leuchtdioden und ihre Anwendung; Band 149 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR, Berlin 1977
[19] Бирюков, исмытатель полупроводниковых Приборов, Zeitschrift РАДИО (UdSSR), 1975, H. 6, S. 43 ff. (in russischer Sprache)
[20] *Koch:* Schwingfrequenzprüfung bei MOSFET, Elektronisches Jahrbuch 1975, S. 278, Militärverlag der DDR, Berlin 1975
[21] *Bulla:* Einfacher MOSFET-Prüfer; Funkamateur 1972, H. 2, S. 84
[22] *Jakubaschk*: MOSFET-Schaltungspraxis, Teil 2, Band 162 der Reihe electronica, Militärverlag der DDR 1978

LEER

1. Auflage, 1978, 1.—20. Tausend
Cheflektorat Militärliteratur
Lizenz-Nr. 5 · LSV: 3539
Lektor: Rainer Erlekampf
Zeichnungen: Christel Ohm
Typografie: Helmut Herrmann · Hersteller: Michael Haase
Vorauskorrektor: Eva Plake · Korrektor: Michael Haase
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme Potsdam
Redaktionsschluß: 03. Oktober 1977
Bestellnummer 745 994 3
DDR 1,90 M